

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

กิตติศักดิ์ แดงทอง และ พรพจน์ ตันเส็ง. (2568). การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มที่รับแรงต้านข้างแบบสถิตในชั้นดินกรุงเทพด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ. วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา), 25(3), 15 หน้า.

พรพจน์ ตันเส็ง, กิตติศักดิ์ แดงทอง และ ฮาซัน คอเด๊ะ. (2568). พฤติกรรมของเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่แบบเดี่ยวและแบบกลุ่มที่รับแรงกระทำทางด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพ. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30 (The 30th National Convention on Civil Engineering). การประชุมสัมมนาจัดโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ร่วมกับ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. โรงแรมเดอะ เกสตร ห้วยหิน, ประจวบคีรีขันธ์.

การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มที่รับแรงด้านข้างแบบสถิตในชั้นดินกรุงเทพ
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

Studying of the Behavior of Single Pile and Group Pile Under Static Laterally Load
in Bangkok Subsoils with 3D Finite Element Method

กิตติศักดิ์ แดงทอง (Kitisak Daengthong)^{1*} ดร.พรพจน์ ตันเส็ง (Dr.Pornpot Tanseng)**

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มที่รับแรงด้านข้างแบบสถิตในชั้นดินกรุงเทพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มที่รับแรงด้านข้างขนาดใหญ่ ทั้งเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มจากการทดสอบเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพ [1] และหาสตีฟเนสของแบบจำลองดิน Hardening soil model ที่เหมาะสม โดยเทียบกับผลทดสอบในสนาม การจำลองเสาเข็มใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติด้วยซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D ผลการศึกษาพบว่าสตีฟเนสของหน่วยแรงรวมที่แปลงมาจากหน่วยแรงประสิทธิภาพของดินสำหรับใช้ในเชิงวิศวกรรมสำหรับการออกแบบเสาเข็มในช่วงการใช้งานที่ยังไม่วิบัติ คือ E_u/S_u อยู่ในช่วง 200 - 300 การจำลองเสาเข็มด้วยแบบจำลอง elastoplastic โดยใช้โมเมนต์ความเคี้ยวของหน้าตัดแต่กร้าวร่วมกับโมเมนต์ดัดประลัยทำให้เกิดตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดในเสาเข็มสูงสุดเท่ากับโมเมนต์ดัดประลัยในกรณีของเสาเข็มเดี่ยวซึ่งสอดคล้องกับการโก่งตัวของเสาเข็มที่ได้จากการวัดด้วย inclinometer และอิทธิพลของความละเอียดของ FEM mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์ยังส่งผลต่อพฤติกรรมของเสาเข็มในการจำลองอีกด้วย

ABSTRACT

This article discusses the behavior of single piles and pile groups under static lateral loading in Bangkok subsoils. The objective is to investigate the behavior of piles subjected to large lateral loads, focusing on single piles and pile groups based on pile test data in Bangkok subsoils [1]. The study also aims to identify the appropriate stiffness parameters for the hardening soil model, referencing field test results. A 3D finite element method using PLAXIS 3D software. The findings reveal that the total stiffness equivalent to the effective stress stiffness of the soil in geotechnical engineering for engineering design of piles under service load conditions without failure is E_u/S_u in the range of 200 - 300. Pile simulations using an elastoplastic model, incorporating the cracked-section moment of inertia and the ultimate bending moment, indicate that the location of the maximum bending moment in the pile matches the ultimate bending moment for single piles. This is consistent with pile deflection measured from inclinometer data. Additionally, the resolution of the FEM mesh used in the simulations significantly affects the pile behavior in the modeling.

คำสำคัญ: วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เสาเข็มรับแรงด้านข้าง ชั้นดินกรุงเทพ

Keywords: Finite element method, Lateral loaded pile, Bangkok subsoils

¹ Corresponding author: Kitisak.D@grad.sut.ac.th

*นักศึกษาลัทธิวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Student, Master of Engineering Program in Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Assistant Professor, School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

บทนำ

ปัจจุบันความต้องการโครงสร้างสาธารณูปโภคและที่อยู่อาศัยในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของเมืองในพื้นที่อันจำกัด ตัวอย่างโครงสร้างเหล่านี้ได้แก่ อาคารสูง ทางยกระดับสำหรับรถไฟฟ้าและรถยนต์ และสะพาน เป็นต้น โครงสร้างเหล่านี้นอกจากจะต้องรับแรงในแนวตั้งได้แล้วจะต้องออกแบบให้รับแรงกระทำด้านข้างที่อาจเกิดจากแรงลม แรงแผ่นดินไหว และแรงเนื่องจากการเบรกของยานพาหนะได้ด้วย ซึ่งแรงที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนบนนี้ต้องถ่ายลงสู่ฐานรากที่เป็นเสาเข็ม เนื่องจากสภาพชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ส่วนบนลึกประมาณ 10-18 เมตร เป็นชั้นดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำจึงต้องใช้เสาเข็มยาวเพื่อถ่ายแรงกระทำไปสู่ชั้นดินลึกที่มีกำลังสูงกว่า ฐานรากส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นฐานรากเสาเข็มกลุ่มและยึดรั้งไว้ด้วย pile cap การคำนวณกำลังต้านทานแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มในอดีตใช้สมการเชิงทฤษฎี [2] ที่ต้องใช้สมมติฐานบางประการ เช่น ชั้นดินต้องเป็นชนิดเดียวกันซึ่งไม่ตรงกับสภาพความเป็นจริงและไม่สามารถคำนวณการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงได้ งานวิจัยกำลังรับแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มส่วนใหญ่ใช้การทดสอบกับแบบจำลองย่อส่วนกับเสาเข็มที่ทำจากเหล็กและพลาสติกในห้องปฏิบัติการ ผลวิจัยพบว่าเสาเข็มในกลุ่มที่จัดเรียงกลุ่มเสาเข็มตามแนวแรง (in-line) และตั้งฉากแนวแรง (side-by-side) ต้องมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มอย่างน้อย 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง จึงจะทำให้พฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่มใกล้เคียงกับเสาเข็มเดี่ยว [3-5] งานวิจัยในห้องปฏิบัติการมีข้อจำกัดในการนำไปใช้เนื่องจากผลของการย่อส่วนที่มีต่อหน่วยแรงในวัสดุ ซึ่งนำไปสู่งานวิจัยพฤติกรรมของเสาเข็มจริงในสนามที่ส่วนใหญ่เป็นการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดสอบที่ค่อนข้างสูง มีงานวิจัยการทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพฯ เป็นเสาเข็มเจาะกลมและเสาเข็มแบบเรีตภาพตัวที่ขนาดใหญ่ [6] และมีการรายงานพฤติกรรมของการรับแรงด้านข้างของเสาเข็มแบบเรีตภาพตัวที่ใช้รับเสาสถานีรถไฟฟ้าสายสีเขียวในชั้นดินกรุงเทพฯ [7] สำหรับการทดสอบฐานรากเสาเข็มกลุ่มที่เป็นเสาเข็มขนาดใหญ่ในชั้นดินกรุงเทพฯ มีเพียงงานวิจัยพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของเสาเข็มเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยทำการทดสอบเสาเข็มกลุ่มแบบ 2 ต้น (F2) ออกแรงดันโดยใช้เสาเข็มกลุ่มแบบ 3 ต้น (F3) ทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวยังได้ทดสอบเสาเข็มเจาะเดี่ยวเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรจนกระทั่งถึงสภาวะวิบัติด้วย [1] และยังมีงานวิจัยอีกแนวทางหนึ่งเป็นการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มโดยการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของเสาเข็มกลมและแบบเรีตรูปตัวที่กับแบบจำลองดิน Mohr-Coulomb และได้พิจารณาถึงการแตกร้าวของหน้าตัดเมื่อโมเมนต์ดัดเกินโมเมนต์แตกร้าว โดยใช้การลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ volume element ที่ใช้จำลองเสาเข็ม [6] มีงานวิจัยเสนอค่า p-y curve ของเสาเข็ม โดยใช้การคำนวณจากสมการที่เสนอโดย Matlock [8], [1] และมีการเสนอ p-y curve ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยการวิเคราะห์หักกลับจากการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากผลทดสอบในสนามโดยใช้ซอฟต์แวร์ Lpile [7] จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าการทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้างในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ นั้นพบได้น้อยมากเมื่อเทียบกับการทดสอบเสาเข็มรับแรงในแนวตั้งเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูง และการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มในอดีตนิยมใช้วิธี p-y curve ซึ่งเป็นการศึกษาเสาเข็มเหล็กเดี่ยวในชั้นดินเหนียว [8] โดยวัสดุดังกล่าวไม่เกิดการแตกร้าวเหมือนคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำสูงมาก และในทางปฏิบัติเสาเข็มนิยมใช้งานในลักษณะเป็นเสาเข็มกลุ่ม ส่งผลให้วิธี p-y curve ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่มีความซับซ้อนดังกล่าวได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ที่เป็นเสาเข็มกลุ่มและเสาเข็มเดี่ยวโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ และใช้แบบจำลองดินที่มีความสามารถจำลองสลิปของดินที่ขึ้นกับระดับความเค้นได้ อีกทั้งยังใช้แบบจำลองเสาเข็มที่ลดเวลาในการคำนวณตามงานวิจัยเปรียบเทียบการจำลองเสาเข็มในซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D โดยใช้ embedded beam element (EBE) และ volume element (VE) [9] ซึ่ง EBE

นี้สามารถกำหนดพฤติกรรมการครากของวัสดุเสาเข็มได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของฐานรากที่รับแรงด้านข้างในโครงการที่มีความซับซ้อนต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มที่รับแรงด้านข้างจากข้อมูลผลทดสอบเสาเข็มจริง และศึกษาหาค่าสตีเฟนสของแบบจำลองดิน Hardening soil model ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการวิเคราะห์ฐานรากที่รับแรงกระทำด้านข้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

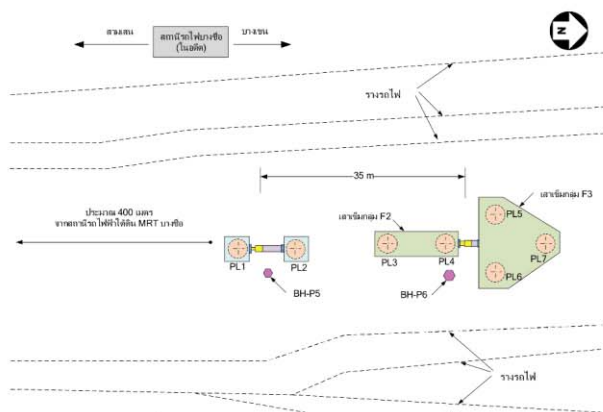
วิธีการวิจัย

- 1) รวบรวมข้อมูลการทดสอบเสาเข็มในสนามและข้อมูลชั้นดินจากงานวิจัยที่ผ่านมา

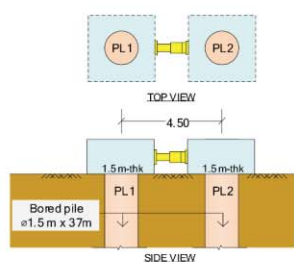
งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่ได้รายงานผลทดสอบฐานรากเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่อรับแรงด้านข้างในสนามเมื่อปี ค.ศ. 1993 [1] ตำแหน่งการทดสอบนี้ตั้งอยู่ที่เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร ซึ่งอยู่ในพื้นที่ชุมทางรถไฟบางซื่อในอดีตก่อนที่จะกลายมาเป็นสถานีกลางบางซื่อในปัจจุบัน สำหรับตำแหน่งโดยประมาณของการทดสอบนั้นอยู่ห่างจากสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน MRT บางซื่อประมาณ 400 เมตรไปทางทิศเหนือตึกภาพที่ 1 ในขณะทดสอบนั้นพื้นที่เป็นพื้นที่โล่งอยู่ระหว่างรางรถไฟ ซึ่งในงานวิจัยมีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ยาว 37 เมตร จำนวน 7 ต้น โดยเสาเข็มหมายเลข PL1 และ PL2 ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยว (F1) เสาเข็ม PL3 และ PL4 เป็นฐานรากเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น (F2) ส่วนเสาเข็ม PL5, PL6 และ PL7 เป็นฐานรากเสาเข็มกลุ่ม 3 ต้น (F3) ก่อนการก่อสร้างเสาเข็มทดสอบมีการเจาะสำรวจสภาพชั้นดินจำนวน 2 หลุม โดยหลุมเจาะ BH-P5 อยู่ใกล้กับจุดทดสอบเสาเข็มเดี่ยว และหลุมเจาะ BH-P6 อยู่ใกล้กับจุดทดสอบเสาเข็มกลุ่ม การทดสอบแบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่ (1) เสาเข็มเดี่ยว PL1 ดันกับ PL2 และ (2) เสาเข็มกลุ่ม F2 ดันกับเสาเข็มกลุ่ม F3 โดยการทดสอบให้แรงกระทำต่อเฟรมทดสอบโดยใช้ hydraulic jack ที่วัดแรงกระทำโดย load cell ค่าเคลื่อนตัวของเสาเข็มวัดโดย dial gauge โดยเสาเข็มได้ติดตั้งท่อ inclinometer ไว้ตลอดความยาวเสาเข็มเพื่อวัดการโก่งตัวในระหว่างให้แรงกระทำ เสาเข็มทดสอบทุกต้นใช้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดประลัย 40 เมกะปาสคัลที่อายุ 28 วัน ใช้เหล็กเสริมกำลังคราก 390 เมกะปาสคัล โดยเหล็กเสริมตามยาวใช้ DB32 จำนวน 44 เส้น คิดเป็นร้อยละ 2 ของหน้าตัดเสาเข็ม และใช้เหล็ก DB10 เป็นปลอกเกลียว

การทดสอบเสาเข็มเดี่ยวให้แรงกระทำระหว่างเสาเข็ม PL1 และ PL2 เท่ากับ 500, 750, 1000, และ 1250 กิโลนิวตัน ภาพที่ 2(a) เป็นภาพตัดขวางของการทดสอบ และภาพที่ 2(b) เป็นผลทดสอบที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็มและแรงกระทำ ส่วนการทดสอบเสาเข็มกลุ่ม F2 ดันกับเสาเข็มกลุ่ม F3 มีการให้แรงกระทำขนาด 500, 700, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 และ 4000 กิโลนิวตัน ภาพที่ 3(a) เป็นภาพตัดการทดสอบ และภาพที่ 3(b) เป็นผลทดสอบที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็มและแรงกระทำ

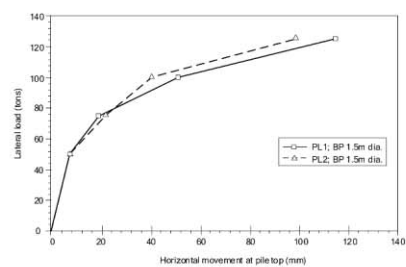
สภาพชั้นดินของโครงการทดสอบเสาเข็มประกอบไปด้วยเปลือกดินหนา 1 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 7 เมตร ถัดลงเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางหนา 6 เมตร จากนั้นเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมากสลับกับชั้นดินทรายจนถึงความลึก 50 เมตร กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวได้จากการทดสอบกำลังรับเฉือนแบบ unconsolidated undrained triaxial test (UU) และ field vane shear test (FV) ส่วนทรายได้ทำการทดสอบ standard penetration test (SPT-N) ดังในภาพที่ 4



ภาพที่ 1 ผังตำแหน่งทดสอบและหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน [1]

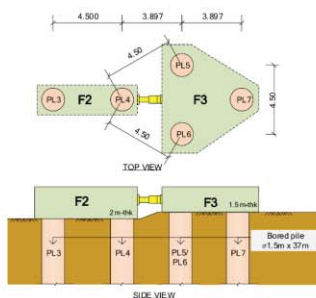


(a)

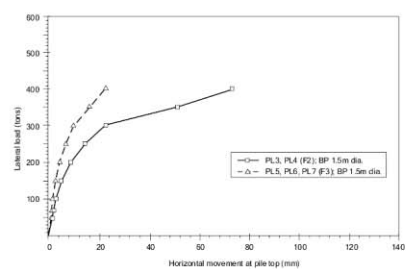


(b)

ภาพที่ 2 การทดสอบเสาเข็มเดี่ยว PL1 ต่อกับ PL2 (a) ภาพตัดการทดสอบ และ (b) ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มกับแรงกระทำ [1]

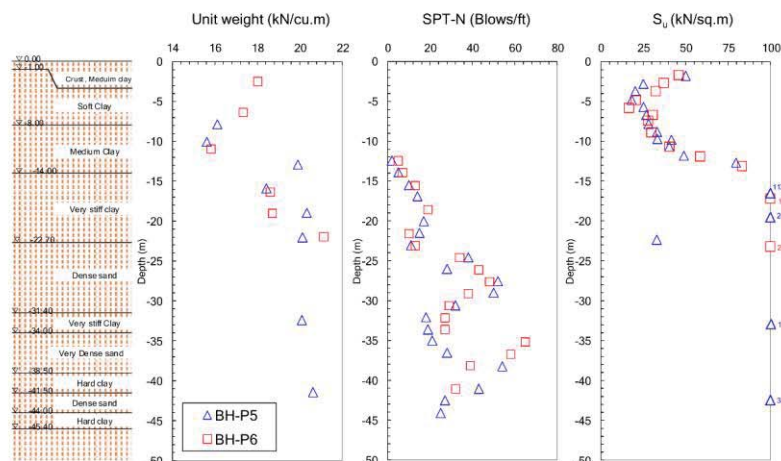


(a)



(b)

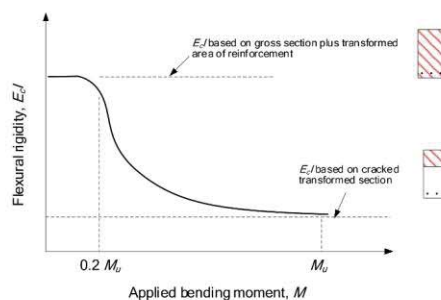
ภาพที่ 3 การทดสอบเสาเข็มกลุ่ม F2 ต่อกับ F3 (a) ภาพตัดการทดสอบ และ (b) ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มกับแรงกระทำ [1]



ภาพที่ 4 สภาพชั้นดินและสมบัติของชั้นดินบริเวณพื้นที่ทดสอบเสาเข็ม [1]

2) การจำลองเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ

การจำลองเสาเข็มที่รับแรงกระทำด้านข้างโดยใช้ซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D ทำการจำลองชั้นดินโดยใช้เอลิเมนต์แบบ 10-node tetrahedral โดยแบบจำลองดิน Hardening soil model (HSM) สำหรับชั้นดินส่วนบนที่เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงชั้นแข็งลึก 22.7 เมตร เนื่องจากแบบจำลองดิน HSM สามารถแปรผันสตีเฟนของดินตามความเค้นที่เกิดขึ้นในดินซึ่งมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของเสาเข็มที่รับแรงกระทำแตกต่างกัน และการวิเคราะห์เป็นแบบไม่ระบายน้ำ เนื่องจากระยะเวลาทดสอบสั้นทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินในชั้นดินเหนียวยังคงอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ส่วนการจำลองชั้นดินส่วนที่ลึกกว่า 22.7 เมตร ใช้แบบจำลองดิน Mohr-Coulomb (MC) โดยโครงสร้างเสาเข็มใช้เอลิเมนต์แบบ EBE ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับเสาเข็มที่ประกอบไปด้วย beam element ที่ทำให้ดินรอบเอลิเมนต์มีปริมาตรคิดเป็นขอบเขตอิลาสติกที่มีรัศมีเทียบเท่าเป็น $R_{eq} = \max\{\sqrt{A/\pi}, \sqrt{2(I_2 + I_3)/A}\}$ ที่ทำให้พฤติกรรมของ EBE เหมือนกับ VE และในแบบจำลองใช้ interface element ที่เป็น contact model แบบ Coulomb friction เพื่อจำลองการแยกหรือเลื่อนไถลออกจากกันระหว่างจุดต่อของ EBE กับเอลิเมนต์ที่ใช้จำลองดิน โดยกำหนด strength reduction factor ด้วย interface reduction factor (R_{inter}) เท่ากับ 0.7 สำหรับชั้นดินกรุงเทพ [10] โดยคำนวณร่วมกับ cohesion (c') และ internal friction angle (ϕ') ในแต่ละชั้นดิน และกำหนด axial skin resistance ใน EBE เป็นแบบ layer dependence เหตุผลที่เลือกใช้การจำลอง interface นั้นเพื่อให้ EBE มีปฏิสัมพันธ์กับดินเหมือนกับ VE และเพื่อให้ผลวิเคราะห์สอดคล้องกับความเป็นจริง หากไม่มีการจำลอง interface element จะทำให้ผลวิเคราะห์จุดต่อของ soil element เคลื่อนไปกับจุดต่อของ pile element ซึ่งไม่ตรงกับลักษณะกายภาพความเป็นจริง นอกจากนี้พฤติกรรมของเสาเข็มทดสอบที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดการแตกร้าวเมื่อโมเมนต์ดัดเกินกว่าโมเมนต์แตกร้าวของคอนกรีต โดยการแตกร้าวจะเริ่มเมื่อโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเท่ากับร้อยละ 20 ของโมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด จากนั้นความแรงจะแปรผกผันกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดจนกระทั่งเมื่อโมเมนต์ดัดถึงจุดประลัย [11] ดังในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแกร่งกับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก [11]

สำหรับหน้าตัดแตรั่วของเสาเข็มที่แปรผกผันกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะกำหนดโดยใช้แบบจำลองวัสดุแบบ elastoplastic โดยเสาเข็มจะมีพฤติกรรมแบบอีลาสติกเมื่อหน่วยแรงในเสาเข็มต่ำกว่าหน่วยแรงคราก (yield stress, σ_y) และจะมีพฤติกรรมเป็นพลาสติกอย่างสมบูรณ์ (perfectly plastic) เมื่อหน่วยแรงในเสาเข็มเท่ากับหน่วยแรงคราก การคำนวณหน่วยแรงครากใช้โมเมนต์พลาสติกของหน้าตัด (M_p) ซึ่งใช้ค่าเท่ากับโมเมนต์ดัดประลัย, ระยะของผิวรับแรงอัดถึงแกนสะเทิน (c) และโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตรั่ว (I_{cr}) ดังสมการ $\sigma_y = M_p c / I_{cr}$ ซึ่งการคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตรั่ว (I_{cr}) สามารถคำนวณโดยการแปลงหน้าตัดเหล็กเสริมเป็นคอนกรีตโดยอัตราส่วนโมดูลาร์ เนื่องจากเหล็กเสริมจัดเรียงกระจายรอบรูปวงกลม จึงพิจารณาการจัดเรียงเหล็กเสริมเป็นเส้นวงแหวน จากนั้นใช้หลักการความสมดุลระหว่างพื้นที่รับแรงอัดจากคอนกรีตกับพื้นที่รับแรงดึงจากเหล็กเสริม อัตราส่วนของโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดที่แตรั่วต่อหน้าตัดที่ไม่แตรั่วเท่ากับร้อยละ 47.5 และโมเมนต์ครากของเสาเข็มทดสอบมีค่าเป็น 7200 กิโลนิวตัน-เมตร ดังนั้นหน่วยแรงครากสำหรับใช้กับ EBE มีค่าเท่ากับ 12900 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร สำหรับ pile cap จำลองโดยใช้เอลิเมนต์ VE แบบ 10-node tetrahedral ใช้แบบจำลองวัสดุแบบ linear elastic การให้แรงกระทำทดสอบใช้เอลิเมนต์แบบ node-to-node anchor (N-N anchor) แล้วกำหนดแรงกระทำเป็นแรงอัด prestress ที่มีค่าเท่ากับแรงที่อ่านได้จาก load cell และเพื่อไม่ให้เกิดหน่วยแรงเข้มข้นตรงจุดต่อระหว่าง N-N anchor กับ pile cap จึงได้จำลองแผ่นรองเหล็กที่ใช้จริงโดยใช้เอลิเมนต์ชนิด plate element เชื่อมระหว่าง pile cap กับ N-N anchor สำหรับตารางที่ 1 เป็นคุณสมบัติของคอนกรีตเสาเข็มและแผ่นเหล็กกระจายแรง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของคอนกรีตเสาเข็มและแผ่นเหล็กกระจายแรง

Material	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν
Concrete	24	25×10^6	0.2
Steel plate	78.5	200×10^6	0.3

สำหรับสตีฟเนสที่ใช้กับแบบจำลองดิน HSM ดังตารางที่ 2 สำหรับดินเหนียวอ่อนและเหนียวปานกลางเป็นสัดส่วนสตีฟเนสในเทอมของหน่วยแรงรวม E_u/S_u เท่ากับ 100 และแปรผันสัดส่วนดังกล่าวเพิ่มเป็น 112.5, 200, 300 และ 400 เพื่อการวิเคราะห์กลับหาสตีฟเนสของชั้นดินเหนียวที่เหมาะสม ส่วนสตีฟเนสของดินเหนียวแข็งคงไว้ที่ E_u/S_u เท่ากับ 125 เพื่อลดตัวแปรในการศึกษาในชั้นดินที่เสาะซึ่มีการโก่งตัวน้อยมาก โดยสตีฟเนสสำหรับชั้นดินเหนียวกรุงเทพในงานวิจัยนี้จะใช้แนวทางจากงานวิจัยของ [12] ซึ่งได้จากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพง diaphragm wall โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินในชั้นดินกรุงเทพ เนื่องจากไม่มีการทดสอบดินบริเวณทดสอบเสาะซึ่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน HSM โดยตรง

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน HSM ที่ความลึกจากผิวดินถึง 22.7 เมตร

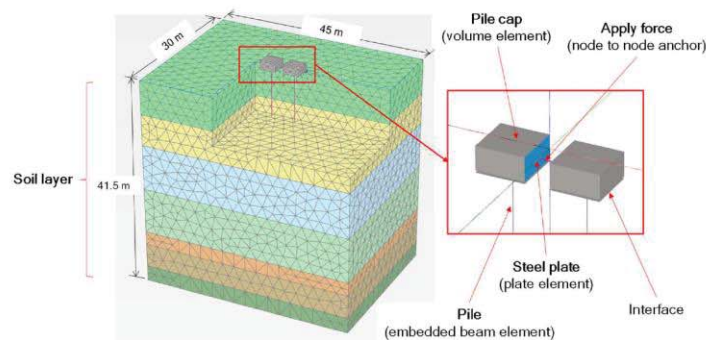
Soil	γ (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (degree)	E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{ed}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	m	ν_{ur}
Soft clay	17	1*	23*	1600	1600	16000	1	0.2
Medium clay	16.5	10*	25*	3200	3200	9600	1	0.2
Very stiff clay	18.5	25*	26*	16500	16500	49500	1	0.2

หมายเหตุ * คือ ค่าพารามิเตอร์ประสิทธิผลของ [12]

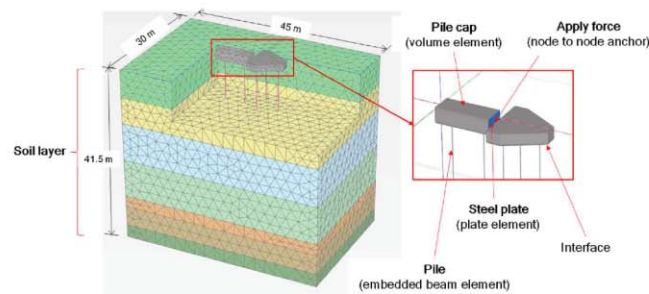
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน MC ที่ความลึก 22.7 เมตรลงไป

Soil	γ (kN/m ³)	S_u (kN/m ²)	ϕ' (degree)	E (kN/m ²)	ν_u
Dense sand	20	-	34	60000	0.495
Very stiff clay	18.5	150	-	75000	0.495
Very dense sand	21	-	36	77500	0.495
Hard clay	20.5	380	-	190000	0.495

หมายเหตุ ค่า E แบ่งตามชนิดของดิน คือ E' สำหรับดินทราย และ E_u สำหรับดินเหนียว



ภาพที่ 6 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มเดี่ยว

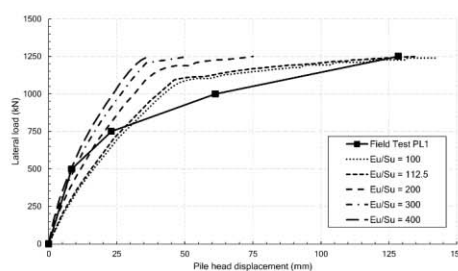


ภาพที่ 7 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3

ผลการวิจัย

1) การวิเคราะห์หาค่าดินสำหรับแบบจำลองดิน HSM

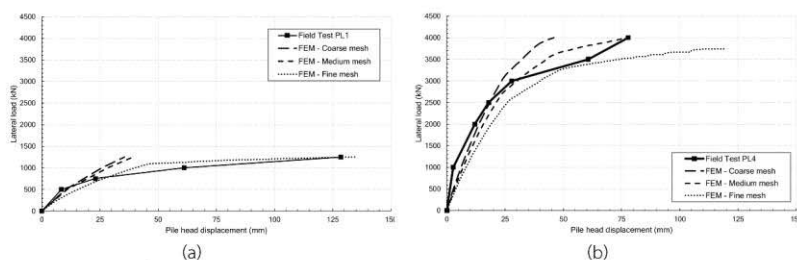
การวิเคราะห์หาค่าดินเพื่อเลือกสตีฟเนสที่เหมาะสมสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งมีอิทธิพลต่อการจำลองมากที่สุด ได้ทำการแปรผันสตีฟเนสของดินสำหรับแบบจำลองดิน HSM ซึ่งสตีฟเนสที่ใช้สำหรับแบบจำลอง HSM อยู่ในรูปของหน่วยแรงรวม เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการให้เป็นประโยชน์กับวิศวกรที่เป็นผู้ออกแบบ จึงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่น (E) กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือน (G) กับโมดูลัสยืดหยุ่นเป็น $G = E' / 2(1 + \nu') = E_u / 2(1 + \nu_u)$ เมื่ออัตราส่วนปัวซองแบบไม่ระบายน้ำ $\nu_u = 0.5$ และอัตราส่วนปัวซองประสิทธิผล $\nu' = 0.2$ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นแบบหน่วยแรงประสิทธิผลกับโมดูลัสยืดหยุ่นแบบหน่วยแรงรวมเป็น $E_{so}^{eff} = 0.8E_u$ และ $E_w^{eff} = 8E_u$ ในภาพที่ 8 เป็นผลวิเคราะห์หาค่าดินโดยใช้ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว PL1 เพื่อเปรียบเทียบ ผลวิเคราะห์หาค่าดินซึ่งให้เห็นว่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบหน่วยแรงรวมที่เหมาะสมสำหรับจำลองพฤติกรรมของเสาเข็มในช่วงการใช้งานที่แรงกระทำไม่เกินร้อยละ 40 ของแรงกระทำประลัยหรือสัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.5 คือ E_u / S_u มีค่าอยู่ในช่วง 200 – 300 ส่วนกรณีของ E_u / S_u เท่ากับ 112.5 นั้นให้ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวที่ครอบคลุมกับผลทดสอบในสนาม งานวิจัยนี้จึงได้ใช้ค่าดังกล่าวนี้ในการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม



ภาพที่ 8 ผลวิเคราะห์หาค่าดินโดยใช้ผลทดสอบเสาเข็มเดี่ยว PL1 เพื่อกำหนดสตีฟเนสของชั้นดินเหนียวอ่อน

2) อิทธิพลของความละเอียดของตาข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์

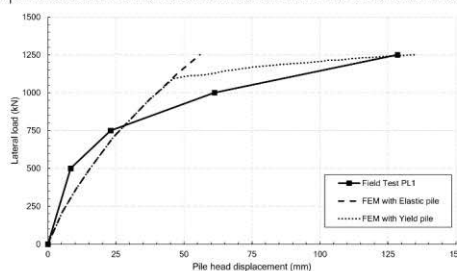
การจำลองเสาเข็มที่รับแรงด้านข้างที่มีพฤติกรรมเข้าสู่สภาวะประลัย ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับความละเอียดตาข่ายวิเคราะห์ (mesh dependency) สำหรับการจำลองเสาเข็ม F1 ที่แรงกระทำต่อต้านสูงสุด 1250 กิโลนิวตัน ดังภาพที่ 9(a) พบว่า ผลวิเคราะห์ด้วย fine mesh ให้ผลการเคลื่อนตัวใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ส่วนการวิเคราะห์ด้วย coarse mesh และ medium mesh ให้ผลการเคลื่อนตัวต่างจากผลทดสอบในสนามมาก ส่วนการจำลองเสาเข็มกลุ่ม F2 ซึ่งมีแรงกระทำต่อต้านสูงสุด 2000 กิโลนิวตัน ดังภาพที่ 9(b) พบว่าผลวิเคราะห์ด้วย medium mesh มีความใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ส่วนกรณีวิเคราะห์ด้วย fine mesh ให้ผลวิเคราะห์มากกว่าผลทดสอบในสนาม โดยอิทธิพลของความละเอียด mesh มีผลต่อการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [13-14] ในงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่า fine mesh สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 ให้ค่าเคลื่อนตัวสูงกว่าค่าในสนาม เนื่องจากมีตำแหน่งของ stress point ที่ไม่ตรงกับตำแหน่งที่มีความเค้นสูงมากในสนาม การคำนวณจึงสามารถดำเนินการอย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการวิบัติ งานวิจัยนี้จึงแนะนำว่าควรพิจารณาใช้ความละเอียด mesh โดยคำนึงถึงพฤติกรรมของเสาเข็ม เมื่อเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ด้วย medium mesh กับ fine mesh ของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มชี้ให้เห็นว่า medium mesh มีความเหมาะสมในการใช้ในการออกแบบเสาเข็มเชิงวิศวกรรมในช่วงที่ไม่เกิดการวิบัติหรือมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงที่เป็นเชิงเส้นตรง



ภาพที่ 9 ผลของ mesh dependency ของการวิเคราะห์เสาเข็ม (a) F1 และ (b) F2

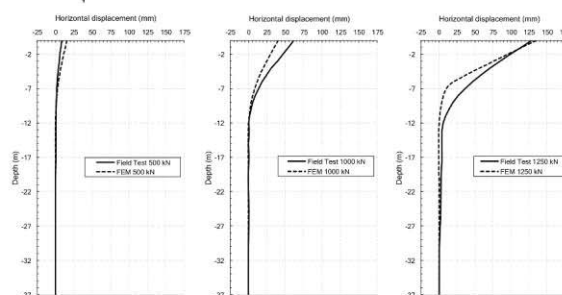
3) ผลการจำลองเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มภายใต้แรงกระทำด้านข้าง

ความสัมพันธ์ของแรงกระทำและการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มของเสาเข็มเดี่ยว (F1) จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกถึงแรงกระทำ 1200 กิโลนิวตัน เสาเข็มจะมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงเมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็มยึดหยุ่นเชิงเส้นตรง หลังจากนั้นเสาเข็มเกิดการครากแล้วมีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นตรง และผลวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ดังภาพที่ 10



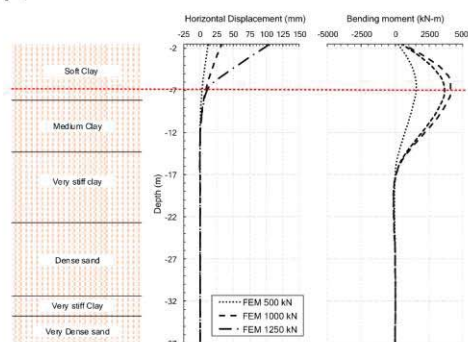
ภาพที่ 10 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับผลทดสอบในสนามของเสาเข็ม F1

สำหรับผลวิเคราะห์การโก่งตัวของเสาเข็มแปรผันตามความลึกที่แรงกระทำ 500, 1000 และ 1250 กิโลนิวตัน โดยใช้ fine mesh ชี้ให้เห็นว่าที่แรงกระทำ 500 กิโลนิวตัน ผลวิเคราะห์การโก่งตัวมีค่ามากกว่าผลทดสอบในสนามประมาณ 7 มิลลิเมตรอยู่ในช่วงพฤติกรรมที่เสาเข็มยังไม่เกิดการวิบัติ หลังจากนั้นผลวิเคราะห์ให้ค่าน้อยกว่าผลทดสอบใน 20 มิลลิเมตรที่แรงกระทำ 1000 กิโลนิวตัน ซึ่งชี้ให้เห็นถึงเสาเข็มเริ่มเกิดการครากและเข้าสู่ภาวะประลัย นอกจากนี้ยังพบว่าผลวิเคราะห์ด้วย FEM แสดงจุดตัดกลับที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ผลวิเคราะห์การโก่งตัวเทียบกับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มเดี่ยว F1

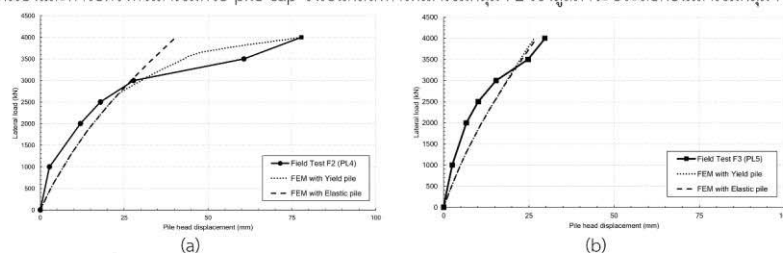
เมื่อพิจารณาโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับการโก่งตัวของเสาเข็มเดี่ยว F1 ในภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่าโมเมนต์ดัดมากที่สุดจะเกิดที่ตำแหน่งความลึกประมาณ 7 เมตรจากผิวดินที่อยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและเป็นตำแหน่งที่เสาเข็มเริ่มเกิดการโก่งตัว โดยมีโมเมนต์ดัดสูงสุด 4090 กิโลนิวตัน-เมตร ที่แรงกระทำ 1250 กิโลนิวตัน



ภาพที่ 12 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์การโก่งตัวและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นของเสาเข็มเดี่ยว F1

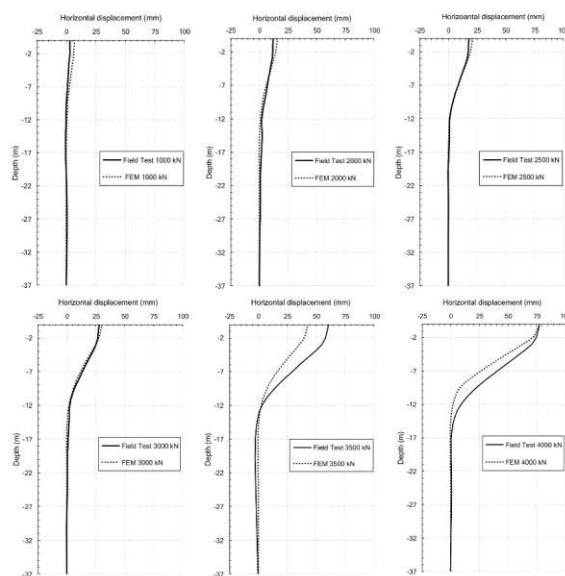
สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ที่ให้แรงกระทำ 1000, 2000, 2500, 3000, 3500 และ 4000 กิโลนิวตัน ผลวิเคราะห์เป็นกราฟความสัมพันธ์ของแรงกระทำและการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม โดยจำลองเสาเข็มที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงเทียบกับ สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 ดังภาพที่ 13(a) จะเห็นได้ว่าเสาเข็มในช่วงแรกมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงไปถึงแรงประมาณ 3000 กิโลนิวตัน เมื่อแรงเพิ่มขึ้นจะพบว่าเสาเข็มมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นตรง เนื่องจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงกว่าหน่วยครากของวัสดุเสาเข็มจนเสาเข็มมีพฤติกรรมเข้าสู่ภาวะประลัย ส่วนผลวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F3 ดังภาพที่ 13(b) พบว่าเสาเข็มมีพฤติกรรมทุกแรงเป็นเชิงเส้นตรง หากพิจารณาที่แรงกระทำ 4000 กิโลนิวตันต่อ pile cap นั้นเป็นแรงกระทำต่อต้นเฉลี่ยจะพบว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 มีแรงกระทำต่อต้นประมาณ 2000 กิโลนิวตันซึ่งสูงกว่าเสาเข็มกลุ่ม

F3 ที่มีแรงกระทำต่อต้านประมาณ 1300 กิโลนิวตัน จะพบว่ามีแรงกระทำต่างกัน 700 กิโลนิวตัน ประกอบกับรูปแบบการจัดเรียงและการยึดรั้งหัวเสาเข็มด้วย pile cap จึงเป็นกลไกทำให้เสาเข็มกลุ่ม F2 เข้าสู่ภาวะประลัยก่อนเสาเข็มกลุ่ม F3



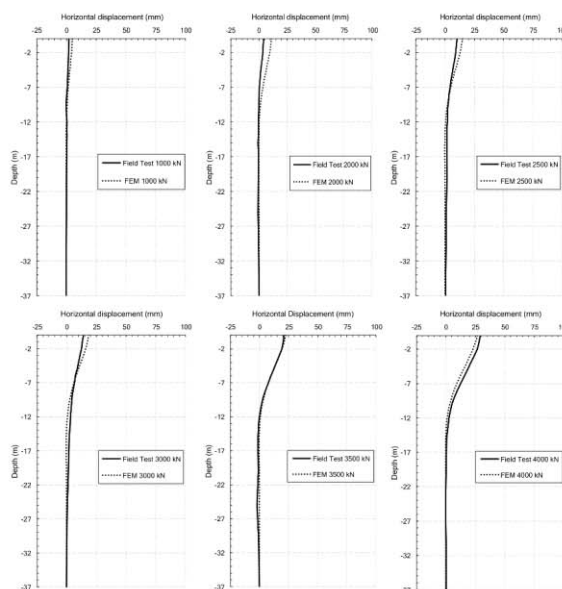
ภาพที่ 13 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มกลุ่ม (a) F2 และ (b) F3

สำหรับผลวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F2 โดยใช้ medium mesh เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของเสาเข็มแปรผันกับความลึกและแรงกระทำ ในภาพที่ 14 จะเห็นได้ที่แรงกระทำ 1000 ถึง 3000 กิโลนิวตัน ผลวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ต่างจากที่แรงกระทำ 3500 ถึง 4000 กิโลนิวตัน ผลวิเคราะห์มีค่าน้อยกว่าผลทดสอบในสนาม เนื่องจากพฤติกรรมของเสาเข็มเข้าสู่ภาวะประลัย โดยที่แรงกระทำ 3500 กิโลนิวตันให้ค่าการเคลื่อนตัวที่ต่างจากผลทดสอบในสนามประมาณ 18 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าผลวิเคราะห์ด้วย FEM แสดงจุดดัดกลับที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามด้วย



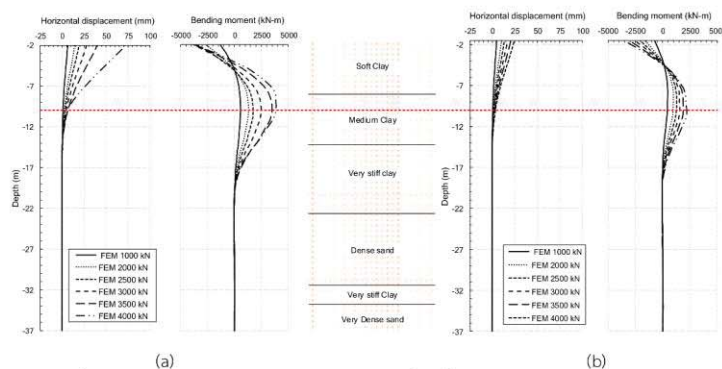
ภาพที่ 14 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเทียบกับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มกลุ่ม F2

สำหรับผลวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F3 โดยใช้ medium mesh เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวแปรผันตามความลึกดังภาพที่ 15 จะเห็นว่าผลวิเคราะห์ที่แรงกระทำ 1000 ถึง 3000 กิโลนิวตัน ผลวิเคราะห์ให้ค่าที่สูงกว่าผลทดสอบในสนามประมาณ 7 มิลลิเมตร ส่วนที่แรงกระทำสูงจากนั้นไปจนถึง 4000 กิโลนิวตัน พบว่าผลวิเคราะห์ให้ค่าที่เท่ากับและต่ำกว่าผลทดสอบในสนามไม่เกิน 5 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าผลวิเคราะห์ด้วย FEM แสดงจุดดัดกลับที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม



ภาพที่ 15 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเทียบกับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มกลุ่ม F3

ส่วนผลวิเคราะห์การโก่งตัวของเสาเข็มกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นแปรผันกับความลึก สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ดังภาพที่ 16(a) และ 16(b) จะพบว่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นมีลักษณะแตกต่างจากเสาเข็มเดี่ยว โดยเกิดโมเมนต์ดัดสูงอย่างมีนัยสำคัญจำนวน 2 ตำแหน่ง คือ ที่ความลึกประมาณ 10 เมตรจากผิวดินที่เป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เสาเข็มเริ่มเกิดการโก่งตัว และอีกตำแหน่ง คือ บริเวณผิวดินใต้ pile cap จากผลการยัดรั้งของหัวเสาเข็มในกลุ่มด้วย pile cap ซึ่งโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นของเสาเข็มกลุ่ม F2 มีค่าสูงกว่า F3 ประมาณ 1670 กิโลนิวตัน-เมตร



ภาพที่ 16 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์การโก่งตัวและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นของเสาเข็มกลุ่ม (a) F2 และ (b) F3

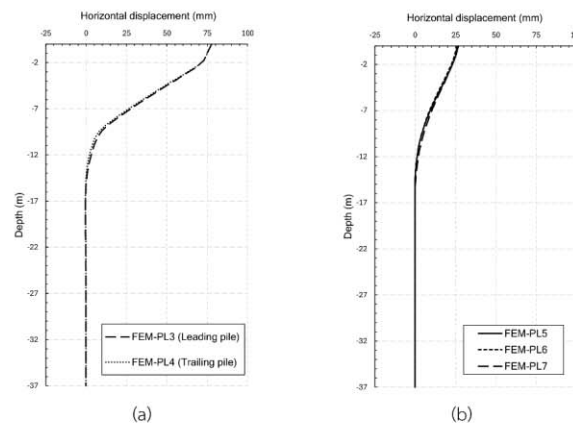
จากผลวิเคราะห์พฤติกรรมเสาเข็มเดี่ยว F1 และเสาเข็มกลุ่ม F2, F3 ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นสามารถสรุปผลวิเคราะห์ที่สำคัญ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปผลวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เสาเข็ม	ความละเอียดของ FEM mesh ที่ใช้	การโก่งตัว สูงสุด (mm)	โมเมนต์ดัด สูงสุด (kN-m)	ความลึกที่เกิด โมเมนต์ดัดสูงสุด (m)	ผลต่างการเคลื่อนตัวของหัว เสาเข็มจากผลวิเคราะห์เทียบกับ ผลทดสอบในสนาม (mm)
F1	Fine mesh	135	4090	7	20
F2	Medium mesh	78	3880	10	18
F3	Medium mesh	27	2205	10	7

4) ผลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มในกลุ่ม

เมื่อพิจารณาการโก่งตัวของเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ที่แรงกระทำ 4000 กิโลนิวตัน เนื่องจากที่แรงกระทำดังกล่าวเสาเข็มมีการเคลื่อนตัวสูงสุด สำหรับผลวิเคราะห์ของเสาเข็มกลุ่ม F2 ที่ประกอบไปด้วยเสาเข็มต้นหน้า (leading pile) และเสาเข็มต้นหลัง (trailing pile) ซึ่งเป็นการจัดเรียงแนวเส้นตรงทิศทางเดียวกับแรงกระทำ (in-line) ส่วนเสาเข็ม F3 เป็นการจัดเรียงรูปแบบผสมระหว่าง side-by-side กับ in-line ซึ่งเสาเข็มทั้งสองกลุ่มมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเสาเข็มแต่ละต้นเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยผลวิเคราะห์ดังภาพที่ 17(a) และ 17(b) เมื่อพิจารณาตามความยาวเสาเข็มจะพบว่า การโก่งตัวของเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มไม่มีการโก่งตัวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความแข็งแรงของ pile cap ที่ยึดรั้งหัวเสาเข็ม, ข้อจำกัดของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มในกลุ่มที่มีระยะห่างเหมาะสมตามงานวิจัย [2 - 4] ส่งผลให้ดินที่ล้อมรอบเสาเข็มนั้นไม่เกิดการทับซ้อนของขอบเขตความเค้น การวิบัติที่จะส่งผลให้ดินมีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำลดลงได้



ภาพที่ 17 ผลวิเคราะห์หัตถิพลของระยะห่างของเสาเข็มในกลุ่ม (a) F2 และ (b) F3

สรุปผลการวิจัย

การจำลองเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิตินั้นโดยใช้แบบจำลองดิน HSM และจำลองเสาเข็มโดย EBE ที่ใช้แบบจำลองวัสดุ elastoplastic ให้ผลที่มีความใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม สำหรับสถิติในของชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลางที่ให้ผลการเคลื่อนตัวครอบคลุมกับผลทดสอบในสนามในเทอมของหน่วยแรงรวมที่แปลงจากหน่วยแรงประสิทธิผล คือ E_u/S_u เท่ากับ 112.5 ส่วนการออกแบบแบบเชิงวิศวกรรมสำหรับเสาเข็มเพื่อใช้งานที่ยังไม่เกิดการวิบัติหรือแรงกระทำไม่เกินร้อยละ 40 ของแรงกระทำประลัยหรือขีดความปลอดภัยเท่ากับ 2.5 พบว่าค่าสถิติที่เหมาะสม คือ E_u/S_u อยู่ในช่วง 200 - 300 ใช้ในกรณีที่ไม่ผลทดสอบหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองดินในห้องปฏิบัติการโดยตรง ซึ่งพิจารณาที่ค่า $\nu_{ur}=0.2$ จะได้ $E_{so}^{ref}=0.8E_u$ และ $E_{ur}^{ref}=10E_{so}^{ref}$ โดยเสาเข็มจะโก่งตัวมากในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลาง ส่วนกรณีเสาเข็มกลุ่มจะพบว่าเสาเข็มในกลุ่มมีการเคลื่อนตัวใกล้เคียงกันทุกต้น เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เพียงพอ ประกอบกับความแข็งแรงของ pile cap และความละเอียดของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ส่วนพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มจะเปลี่ยนแปลงไม่เชิงเส้นเมื่อโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นสูงกว่าโมเมนต์ครากของหน้าตัด โดยผลวิเคราะห์ที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของตาข่ายวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับพฤติกรรมของเสาเข็ม งานวิจัยนี้แนะนำให้ใช้ medium mesh ในการจำลองเสาเข็มที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงใช้งานหรือยังไม่เกิดการวิบัติ

เอกสารอ้างอิง

1. Wachirapornpong A. Performance of grouted and non-grouted bored piles in Bangkok subsoils. [MEng Thesis]. Pathum Thani: Asian Institute of Technology; 1993.
2. Broms BB. Lateral resistance of piles in cohesive soils. Journal of the soil mechanics and foundations division. 1964; 90(2):27-63.

3. Cox WR, Dixon DA, Murphy BS. Lateral-load tests on 25.4-mm (1-in.) diameter piles in very soft clay in side-by-side and in-line groups. In *Laterally loaded deep foundations: Analysis and performance* 1984. ASTM International.
4. Wang ST, Reese LC. Study of design method for vertical drilled shaft retaining walls. Final report. 1986.
5. Shibata T, Yashima A, Kimura M. Model tests and analyses of laterally loaded pile groups. *Soils and foundations*. 1989; 29(1):31-44.
6. Submanee Wong C. Behavior of vertical and lateral load on T-Shape barrette and bored piles. Doctoral dissertation, Chulalongkorn University, Thailand. 2009.
7. Thipsunontha S, Sramoon W, Submanee Wong C. Behavior of Soil-Pile Interaction of Barrette Pile under Lateral Loading. *Engineering Transactions: A Research Publication of Mahanakorn University of Technology*. 2016; 19(1):39-47.
8. Matlock H. Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay. In *Offshore technology conference* 1970. (pp. OTC-1204). OTC.
9. Dao TP. Validation of PLAXIS embedded piles for lateral loading. [MSc Thesis]. Delft University of Technology, Netherlands. 2011 Apr.
10. Surarak C. Geotechnical Aspects of the Bangkok MRT Blue Line Project. [PhD Thesis]. Griffith University, Australia; 2010.
11. Wang C, Salmon GC. *Reinforced Concrete Design*. 6th ed. New York: Wiley; 1998.
12. Likitlersuang S, Chheng C, Surarak C, Balasubramaniam A. Strength and stiffness parameters of Bangkok clays for finite element analysis. *Geotech Eng*. 2018; 49(2):150-6.
13. De Borst R, Vermeer PA. Possibilities and limitations of finite elements for limit analysis. *Geotechnique*. 1984; 34(2):199-210.
14. Koutsabeloulis NC, Griffiths DV. Numerical modelling of the trap door problem. *Geotechnique*. 1989; 39(1):77-89.

พฤติกรรมของเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่แบบเดี่ยวและแบบกลุ่มที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ในชั้นดินกรุงเทพ

Behavior of Large Bored Single and Group Piles under Lateral Loads in Bangkok Subsoils

พรพจน์ ตันเส่ง^{1,*}, กิตติศักดิ์ แดงทอง² และ ชานัน คอแฉะ²

^{1,2} สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

*Corresponding author; E-mail address: pompot@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงพฤติกรรมของเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ในชั้นดินกรุงเทพที่รับแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มกลุ่มแบบ 2 ต้น, เสาเข็มกลุ่มแบบ 3 ต้น, เสาเข็มเดี่ยว, เสาเข็มแบบเรีตรับแรงด้านแคบและด้านกว้าง, และเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวที ในงานวิจัยได้ศึกษาประสิทธิภาพในการรับแรงด้านข้างของเสาเข็ม และหาสตีฟเนสที่เหมาะสมของแบบจำลองดิน Hardening soil model ด้วยการวิเคราะห์กลับจากการจำลองเสาเข็มและดินด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ ในการวิเคราะห์กลับใช้ข้อมูลการโก่งตัวของเสาเข็มที่รับแรงกระทำจากการทดสอบเสาเข็มขนาดจริงในสนาม โดยเสาเข็มในงานวิจัยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร และ 1.65 เมตร ส่วนเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวทีมีขนาดหน้าตัด 0.8 เมตร x 2 เมตร เสาเข็มแบบเรีตรูปตัวทีขนาดปึก 1 เมตร x 3 เมตร ขนาดเอว 1 เมตร x 2 เมตร ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าเสาเข็มเจาะกลุ่มแบบ 2 ต้น, 3 ต้น และเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวทีมีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาเป็นเสาเข็มแบบเรีตรับแรงด้านแคบและเสาเข็มเดี่ยว ส่วนเสาเข็มแบบเรีตรับแรงด้านกว้างมีประสิทธิภาพต่ำสุด ผลวิเคราะห์กลับหาสตีฟเนสในเทอมของหน่วยแรงรวมที่แปลงมาจากหน่วยแรงประสิทธิภาพเพื่อใช้สำหรับออกแบบเสาเข็มที่สภาวะใช้งาน คือ E_u / S_u อยู่ในช่วง 200 – 300 และสามารถใช้ความละเอียดแบบ medium mesh ที่ให้ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมที่สภาวะยังไม่วิบัติได้

คำสำคัญ: เสาเข็มเจาะ, แรงกระทำด้านข้าง, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ชั้นดินกรุงเทพ

Abstract

This study examines the lateral load behavior of large bored piles in Bangkok subsoils, focusing on two-pile groups, three-pile groups, single piles, barrettes loaded along the narrow and wide sides, and T-shaped barrettes. The objective is to assess the lateral load performance of different pile configurations and to calibrate appropriate stiffness parameters for the Hardening Soil model through back-analysis, using three-dimensional finite element simulations. The back-analysis was conducted based on full-scale lateral load test data, with the test piles having

diameters of 1.5 m and 1.65 m. The barrettes had cross-sectional dimensions of 0.8 m x 2 m, while the T-shaped barrettes had flange dimensions of 1 m x 3 m and web dimensions of 1 m x 2 m. Results show that two-pile groups, three-pile groups, and T-shaped barrettes achieve the highest lateral load efficiencies, followed by barrettes loaded along the narrow side and single piles. Barrettes loaded along the wide side exhibited the lowest efficiency. The calibrated stiffness, expressed in terms of the total stress for E_u / S_u which is suitable for serviceability limit state design, ranged between 200 and 300. Moreover, the findings suggest that a medium-mesh resolution provides a sufficient balance between computational efficiency and accuracy in capturing pre-failure pile behavior.

Keywords: Bored pile, Lateral load, Finite element method, Bangkok subsoils

1. คำนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้โครงสร้างพื้นฐานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของประชากรในเมืองที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีการขยายระบบขนส่งมวลชนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเดินทาง ได้แก่ การสร้างถนนและระบบขนส่งทางราง โดยเฉพาะในเมืองขนาดใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานครและปริมณฑล การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่เหล่านี้มักมีลักษณะเป็นทางยกระดับสำหรับเป็นถนนหรือระบบขนส่งทางราง เช่น รถไฟฟ้า ทางด่วน เพื่อให้เกิดการใช้พื้นที่ซึ่งมีอยู่จำกัดให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด โครงสร้างดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงแรงกระทำด้านข้างที่เกิดจากแรงเหวี่ยงและแรงเบรกของยานพาหนะ นอกจากนี้ยังมีแรงกระทำด้านข้างที่เกิดจากแรงลมและแผ่นดินไหวต่ออาคารสูง ซึ่งเห็นได้ชัดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในต่างประเทศที่ส่งผลถึงอาคารสูงในพื้นที่กรุงเทพมหานครเมื่อวันที่ 28 มีนาคม 2568 ที่ผ่านมา โดยแรงเหล่านี้จะถูกถ่ายโอนผ่านโครงสร้างและตอม่อลงสู่ฐานราก ก่อนที่จะส่งต่อไปยังเสาเข็ม การออกแบบฐานรากเสาเข็มมักไม่พิจารณาแรงกระทำด้านข้าง เนื่องจากมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของโครงสร้างน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงกระทำใน

แนวตั้ง โดยพฤติกรรมของเสาเข็มที่รับแรงด้านข้างนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างเสาเข็มและดินที่รองรับ ดังนั้น เสาเข็มกับดินจึงเป็นปฏิสัมพันธ์กัน โดยพฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความชะลุดของเสาเข็มและการยึดรั้งหัวเสาเข็มเข้ากับฐานราก ซึ่งอัตราส่วนความชะลุดของเสาเข็มสามารถจำแนกได้เป็นสองรูปแบบ ได้แก่ เสาเข็มสั้นและเสาเข็มยาว โดยกรณีของเสาเข็มสั้นนั้นดินที่ด้านแรงกระทำจากเสาเข็มจะเกิดการบีบอัดก่อนที่เสาเข็มจะขยับ และสำหรับกรณีของเสาเข็มยาว หากดินส่วนบนเกิดการบีบอัดเสาเข็มยาวจะทำหน้าที่กระจายแรงกระทำด้านข้างลงไปในดินส่วนที่ลึกต่อไป เมื่อโครงสร้างเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างที่สูงจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดที่สูงขึ้นและทำให้โครงสร้างเสาเข็มเกิดการวิบัติในเวลาต่อมา

ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพมหานคร มีชั้นดินเหนียวที่มีความลึกจากผิวดินประมาณ 10 – 18 เมตร ซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ ดังนั้นเสาเข็มที่ใช้ในการรับแรงด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพมหานครจึงจำเป็นต้องใช้เสาเข็มยาวเพื่อให้กำลังต้านทานแรงด้านข้างสูงขึ้น ลักษณะของเสาเข็มที่นิยมใช้นั้นมีทั้งเสาเข็มเจาะแบบกลม และเสาเข็มเจาะแบบเหลี่ยม(แปแบริด) ซึ่งมีผู้ทำการวิจัยพฤติกรรมของเสาเข็มรับแรงด้านข้างแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบเสาเข็มขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบเสาเข็มขนาดใหญ่ในสนาม

การทดสอบเสาเข็มขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ (small-scale test) ได้มีผู้ทำวิจัยไว้ในชั้นดินต่างประเทศของ [1-3] ผลการวิจัยพบว่าเสาเข็มในกลุ่มที่จัดเรียงกลุ่มเสาเข็มตามแนวแรง (in-line) และตั้งฉากแนวแรง (side-by-side) ต้องมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มอย่างน้อย 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง จึงจะทำให้พฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่มใกล้เคียงกับเสาเข็มเดี่ยว ซึ่งงานวิจัยในห้องปฏิบัติการมีข้อจำกัดในการนำไปใช้เนื่องจากผลของการยอส่วนที่มีต่อหน่วยแรงในวัสดุทำเสาเข็ม

ส่วนการทดสอบเสาเข็มขนาดใหญ่ในสนามที่ฝังลงในดินลึกในชั้นดินกรุงเทพ มีงานวิจัยของ [4] ได้รวบรวมข้อมูลการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มรับแรงด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพ โดยเสาเข็มที่ใช้ในการทดสอบเป็นเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ลึก 37 เมตร เป็นการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว (F1) ดันกัน และการทดสอบเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น (F2) ดันกับเสาเข็มกลุ่ม 3 ต้น (F3) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ [5] ได้ทำการเสนอผลทดสอบเสาเข็มแปแบริดขนาด 0.8 เมตร x 2 เมตรที่ใช้รับเสาสถานีรถไฟฟ้าสายสีเขียวในชั้นดินกรุงเทพ และยังมีการทดสอบเสาเข็มเจาะกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.65 เมตร ลึก 56 เมตร และเสาเข็มแปแบริดรูปตัวทีขนาดปิก 3 เมตร x 1 เมตร และขนาดเอว 2 เมตร x 1 เมตร ลึก 56 เมตร ซึ่งรายงานไว้ในงานวิจัยของ [6]

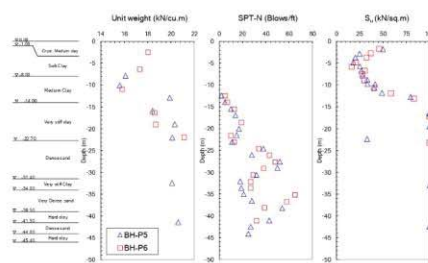
สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้าง มีงานวิจัยของ [6] ได้ใช้ซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเจาะกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.65 เมตร และเสาเข็มแปแบริดรูปตัวทีที่มีขนาดของปิก 3 เมตร x 1 เมตร และขนาดเอว 2 เมตร x 1 เมตร จำลองเสาเข็มโดยใช้ volume element (VE) กับแบบจำลองดิน Mohr-Coulomb (MC) และพิจารณาการแตกตัวของหน้าตัดโดยการลดสทิพเนสของเสาเข็มในแบบจำลอง และยังมีการวิจัย

ของ [5] ได้เสนอ p-y curve ของเสาเข็มแปแบริดขนาด 0.8 เมตร x 2 เมตร ในชั้นดินเหนียวอ่อนโดยการวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ Lpile จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เสาเข็มที่รับแรงด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพมีการทดสอบในสนามน้อยมากเมื่อเทียบกับเสาเข็มรับแรงในแนวตั้ง เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูงมาก และการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มในอดีตนิยมใช้วิธี p-y curve ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยว ต่างจากการก่อสร้างเสาเข็มในปัจจุบันที่นิยมใช้งานในรูปแบบเสาเข็มกลุ่ม ทำให้วิธี p-y curve ไม่สามารถอธิบายความซับซ้อนดังกล่าว

งานวิจัยจึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวซึ่งประกอบไปด้วยเสาเข็มเจาะกลมและเสาเข็มเจาะแปแบริด และพฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่ม ส่วนการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์กลับหาค่าสทิพเนสของดินโดยแบบจำลองดิน Hardening soil model (HSM) และจำลองโครงสร้างเสาเข็มด้วย embedded beam element (EBE) ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D

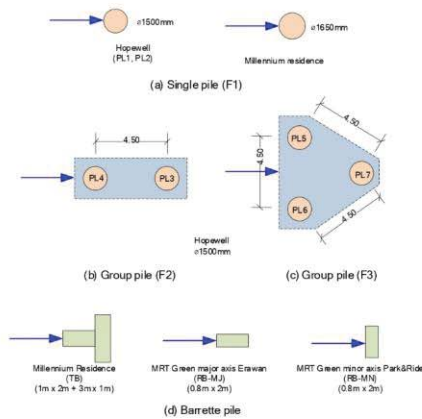
2. การทดสอบเสาเข็มรับแรงทางด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพ

ลักษณะทั่วไปของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพนั้นเป็นดินที่ถูกพัฒนาโดยกระแสน้ำจากตอนบนของพื้นที่ จึงมีขนาดอนุภาคเล็กมาก โดยมีคุณสมบัติทางวิศวกรรม คือ มีปริมาณความชื้นสูงและมีการรับแรงเฉือนต่ำ โดยรูปที่ 1 เป็นคุณสมบัติชั้นดินบริเวณตำแหน่งการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มบริเวณสถานีกลางบางซื่อ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร



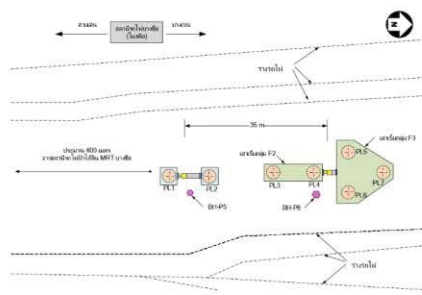
รูปที่ 1 ภาพตัดชั้นดินกรุงเทพ [4]

สำหรับเสาเข็มที่ทำการทดสอบรับแรงกระทำด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพนั้นมีหลายหน้าตัด ได้แก่ เสาเข็มเจาะเดี่ยว (F1) เสาเข็มเจาะกลุ่ม 2 ต้น (F2) และกลุ่ม 3 ต้น (F3) เสาเข็มแปแบริดรับแรงด้านแคบ (RB-MJ), เสาเข็มแปแบริดรับแรงด้านกว้าง (RB-MN) และเสาเข็มแปแบริดรูปตัวที (TB) รูปที่ 2 เป็นหน้าตัดเสาเข็มที่ทดสอบในชั้นดินกรุงเทพที่รวบรวมไว้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2 หน้าตัดเสาเข็มที่ทดสอบรับแรงกระทำในชั้นดินกรุงเทพฯ

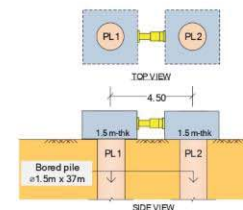
การทดสอบเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างในสนามในชั้นดินกรุงเทพฯนั้น ทำโดยการหล่อเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กในพื้นที่ทดสอบ ให้แรงกระทำ โดย hydraulic jack วัดขนาดแรงกระทำโดย load cell และมีการติดตั้ง steel plate เพื่อลดความเข้มข้นของแรงกระทำไม่ให้เกิดขึ้นเพียงจุดใดจุดหนึ่งที่มีผิวของ pile cap และวัดการโก่งตัวโดยการติดตั้ง inclinometer ตามแนวยาวของเสาเข็มที่ทำการทดสอบ รูปที่ 3, รูปที่ 4 และรูปที่ 5 เป็นผังทดสอบและภาพตัดการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มตามลำดับ โดยรวบรวมไว้ในงานวิจัยของ [4] เสาเข็มที่ทดสอบเป็นเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เมตร ลึก 37 เมตร ตำแหน่งทดสอบอยู่บริเวณสถานีกลางบางซื่อ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร



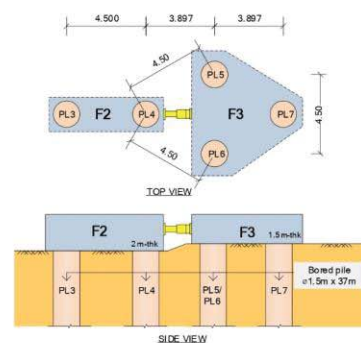
รูปที่ 3 ผังทดสอบเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม [4]

การทดสอบเสาเข็มเจาะเดี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.65 เมตร ลึก 56 เมตร และการทดสอบเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวที่ขนาดปีก 3 เมตร x 1 เมตร และเอวขนาด 2 เมตร x 1 เมตร ลึก 56 เมตร ได้รายงานไว้ในงานวิจัยของ [6] โดยรูปที่ 6, รูปที่ 7 และรูปที่ 8 เป็นผังการทดสอบและภาพตัดการทดสอบเสาเข็มและเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวที่ของโครงการ Millennium

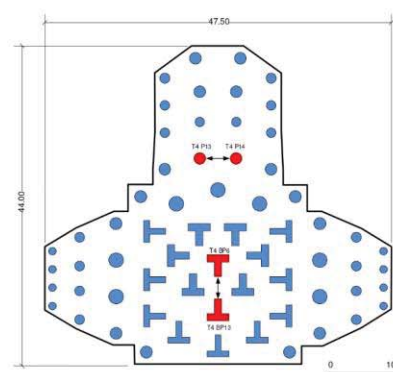
Residence มีตำแหน่งทดสอบอยู่บริเวณซอยสุขุมวิท 20 เขตคลองเตย กรุงเทพมหานคร



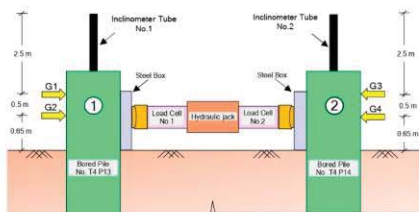
รูปที่ 4 ภาพตัดการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว [4]



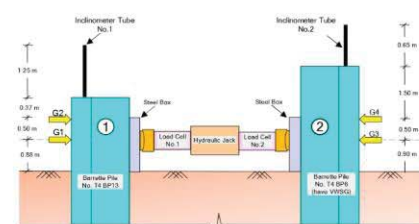
รูปที่ 5 ภาพตัดการทดสอบเสาเข็มกลุ่ม [4]



รูปที่ 6 ผังการทดสอบเสาเข็มฐานรากของอาคาร Millennium Residence [6]



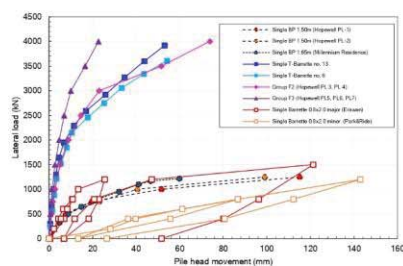
รูปที่ 7 ภาพตัดการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว [6]



รูปที่ 8 ภาพตัดการทดสอบเสาเข็มรูปตัวที [6]

3. ประสิทธิภาพของเสาเข็มรับแรงด้านข้างจากผลทดสอบเสาเข็มในสนาม

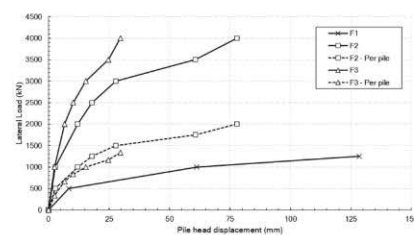
เปรียบเทียบผลทดสอบในสนามของเสาเข็มรับแรงด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพฯ ในรูปที่ 9 เป็นการเปรียบเทียบแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มหน้าตัดต่าง ๆ ที่รวบรวมข้อมูลทดสอบไว้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเสาเข็มกลุ่มแบบ F2, F3 และเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวทีมีประสิทธิภาพสูงที่สุด รองลงมาเป็นเสาเข็มแบบเรีตรับแรงด้านแคบและเสาเข็มเดี่ยว ส่วนเสาเข็มแบบเรีตรับแรงด้านกว้างมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด



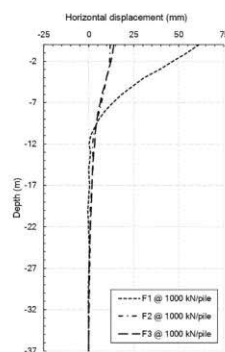
รูปที่ 9 ผลทดสอบเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

สำหรับผลทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เมตร ลึก 37 เมตร ในรูปที่ 10 เป็นการเปรียบเทียบเสาเข็มกลุ่มแบบ F2 และ F3 ที่มีแรงกระทำด้านเดียวเทียบกับเสาเข็มเดี่ยว F1 เท่ากับ 1000 กิโลนิวตัน/ตัน ในรูปที่ 11 เป็นการโก่งตัวของเสาเข็มเดี่ยว F1 ซึ่งประมาณเป็นแรงกระทำ

เสาเข็มต่อต้านในเสาเข็มกลุ่ม F2 ที่ 2000 กิโลนิวตัน/pile cap และเสาเข็มกลุ่ม F3 ที่ 3000 กิโลนิวตัน/pile cap โดยผลจากการเปรียบเทียบชี้ให้เห็นว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 มีความแข็งแรงสูงกว่าเสาเข็มเดี่ยว F1 ที่แรงกระทำด้านข้างต่อเสาเข็มหนึ่งต้นเฉลี่ยเท่ากัน เนื่องจากผลของการยึดรั้งหัวเสาเข็มกับ pile cap ที่ลดการหมุนและการโก่งตัวของหัวเสาเข็มในกลุ่ม ทำให้เสาเข็มแต่ละต้นมีพฤติกรรมไม่อิสระเหมือนกับเสาเข็มเดี่ยว



รูปที่ 10 ผลทดสอบเสาเข็มเจาะ F1, F2 และ F3



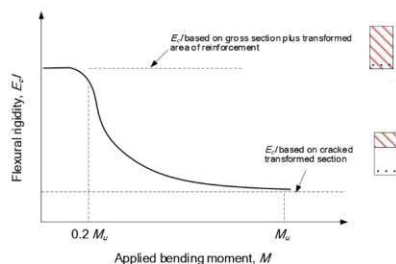
รูปที่ 11 การโก่งตัวของเสาเข็มที่แรงกระทำเฉลี่ย 1000 กิโลนิวตันต่อต้น

นอกจากนี้ในกรณีเสาเข็มแบบเรีตขนาด 0.8 เมตร x 2 เมตร ทดสอบให้แรงกระทำในทิศทางที่แตกต่างกันนั้น พบว่าการให้แรงกระทำด้านที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดสูง คือ ด้านแคบ 0.8 เมตร (RB-MJ) จะมีการเคลื่อนตัวน้อยกว่าการให้แรงกระทำด้านกว้าง 2 เมตร (RB-MN)

4. การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D ใช้เอลิเมนต์แบบ 10-node tetrahedral ใช้แบบจำลองดิน HSM สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง เนื่องจากชั้นดินส่วนนี้มีการโก่งตัวที่วัดได้ในสนามมาก ซึ่งแบบจำลองดิน HSM มีการแปรผันสตีฟเนสของดินจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นในดิน และพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองดินนี้ใช้ตามแนวทางของ [7] ส่วนความลึกถัดจากนั้นลงมาพิจารณาใช้แบบจำลองดิน MC เนื่องจากมีการโก่งตัวของ

เสาเข็มในชั้นดินนี้มีค่าน้อยมาก โดยการวิเคราะห์เป็นแบบไม่ระบายน้ำ เนื่องจากการทดสอบเสาเข็มอยู่ในช่วงระยะเวลาสั้นมาก ส่งผลให้แรงดันน้ำ ส่วนเกินในชั้นดินเหนียวยังอยู่ในช่วงระหว่างระหว่างเม็ดดิน โดยเสาเข็มใช้การ จำลองเอนเมนต์แบบ EBE ที่เอนเมนต์พัฒนาขึ้นสำหรับการจำลอง เสาเข็ม ซึ่งประกอบด้วย beam element ที่ทำให้ดินล้อมรอบเสาเข็มนั้นมี ปริมาตรเป็นขอบเขตออสติกเป็นวิธีที่มีเทียบเท่ากับหน้าตัดวงกลม ส่งผลให้ เสาเข็มที่จำลองด้วย EBE มีพฤติกรรมเหมือน VE และในแบบจำลองใช้ interface element เพื่อจำลองการแยกหรือการเลื่อนไหลออกจากกัน ระหว่างจุดต่อของ EBE และเอนเมนต์ที่ใช้จำลองดิน สำหรับพฤติกรรมของ เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดการแตกร้าว โดย [8] ระบุว่าหน้าตัดของ คอนกรีตจะเริ่มแตกร้าวเมื่อโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเท่ากับร้อยละ 20 ของ โมเมนต์ดัดที่ปล่อยของหน้าตัด หลังจากนั้นความแข็งแรงจะแปรผกผันกับ โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดจนกระทั่งเมื่อโมเมนต์ดัดเท่ากับโมเมนต์ปล่อย ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างสติฟเนสกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัด คอนกรีตเสริมเหล็ก [8]

สำหรับหน้าตัดแตกร้าวของเสาเข็มจะกำหนดโดยใช้แบบจำลองวัสดุ แบบ elastoplastic ซึ่งจะส่งผลให้พฤติกรรมของเสาเข็มเกิดการคราก เมื่อ โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นสูงกว่าโมเมนต์ครากของหน้าตัด ส่วนการคำนวณหน่วย แรงคราก (yield stress, σ_y) ของเสาเข็มในแบบจำลองดังสมการที่ 1

$$\sigma_y = \frac{M_p c}{I_{cr}} \quad (1)$$

โดยโมเมนต์พลาสติก (M_p) ของหน้าตัดสำหรับเสาเข็มกลมและ เสาเข็มแบนนั้นสามารถหาได้จากแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของเสาคอนกรีต เสริมเหล็กซึ่งพิจารณาใช้เท่ากับโมเมนต์ปล่อยของหน้าตัดหรือหาได้จาก โมเมนต์ที่ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง (curvature) ที่ จุดสิ้นสุดพฤติกรรมเชิงเส้นตรง ตามแนวทางของ [6] ส่วนโมเมนต์ความ เหนียวของหน้าตัดแตกร้าว (I_{cr}) คำนวณโดยการแปลงหน้าตัดเหล็กเสริม เป็นคอนกรีตโดยอัตราส่วนโมดูลาร์ จากนั้นใช้หลักการความสมดุลระหว่าง พื้นที่รับแรงอัดจากคอนกรีตและพื้นที่รับแรงดึงจากเหล็กเสริม และระยะ

จากผิวรับแรงอัดถึงแกนสะเทิน (C) สำหรับเสาเข็มเจาะเดี่ยวและกลุ่มจะ ใช้การจำลอง pile cap โดยเอนเมนต์ VE แบบ 10-node tetrahedral ใช้ แบบจำลองวัสดุแบบ linear elastic ในการให้แรงกระทำแก่เสาเข็มนี้ใช้ เอนเมนต์แบบ node-to-node anchor แล้วกำหนดแรงกระทำเป็นแรงอัด prestress และใช้ point load สำหรับเสาเข็มแบริด จากนั้นกำหนดขนาด ของแรงมีค่าเท่ากับแรงที่อ่านได้จาก load cell และใช้ plate element เพื่อกระจายแรงกระทำให้ทั่ว pile cap สำหรับข้อมูลคอนกรีตและแผ่น เหล็กกระจายแรงเป็นไปตามตารางที่ 1 ในการพิจารณาสติฟเนสของ แบบจำลองดิน HSM ที่เป็นหน่วยแรงประสิทธิผล E_{so}^{ref} , E_{oed}^{ref} และ E_{ur}^{ref} เป็นสติฟเนสในเทอมของหน่วยแรงรวม E_u นั้นจะใช้ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือน (G) กับโมดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผล (E') และ โมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (E_u) ดังสมการที่ 2

$$G = \frac{E'}{2(1+\nu')} = \frac{E_u}{2(1+\nu_u)} \quad (2)$$

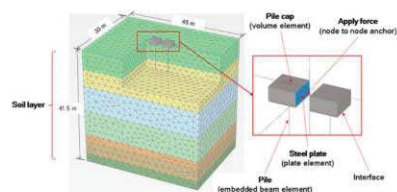
โดยพิจารณาที่อัตราส่วนปัวซองแบบไม่ระบายน้ำ (ν_u) เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนปัวซองประสิทธิผล (ν') เท่ากับ 0.2 จะได้ความสัมพันธ์ สำหรับสติฟเนสสำหรับแบบจำลองดิน HSM ในเทอมของหน่วยแรงรวม คือ $E_{so}^{ref} = E_{oed}^{ref} = 0.8E_u$ ส่วนค่าสติฟเนสของ $E_{ur}^{ref} = 8E_u$ สำหรับดินเหนียวอ่อน และ $E_{ur}^{ref} = 2.4E_u$ สำหรับดินเหนียวแข็งปาน กลางและดินเหนียวแข็งมาก ซึ่งพิจารณาใช้ตามแนวทางของ [7]

การวิเคราะห์กลับเพื่อกำหนดค่าสติฟเนสที่เหมาะสมของเสาเข็มเดี่ยว (F1) นั้นจะทำการแปรผันสติฟเนสในเทอมของหน่วยแรงรวม E_u/S_u เท่ากับ 100, 112.5, 200, 300 และ 400 โดยตารางที่ 3, ตารางที่ 4, และ ตารางที่ 5 เป็นข้อมูลคุณสมบัติขึ้นดินสำหรับเสาเข็มเดี่ยวกับเสาเข็มกลุ่ม, เสาเข็มแบริด RB-MJ และเสาเข็มแบริด RB-MN ส่วนเสาเข็มแบริด TB จะใช้สติฟเนสของดินที่แปลงมาจากแบบจำลองดิน MC ของงานวิจัย [6] จากค่าของ E_u ในตารางที่ 6 โดยรูปที่ 13, รูปที่ 14, รูปที่ 15 และรูปที่ 16 เป็น FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มเดี่ยว, เสาเข็มกลุ่ม, เสาเข็ม แบริด และเสาเข็มแบริดรูปตัว T ตามลำดับ

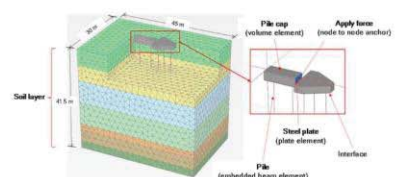
สำหรับตารางที่ 2 เป็นผลการคำนวณคุณสมบัติสำหรับใช้ในการจำลอง เสาเข็มด้วย EBE ที่ประกอบไปด้วยโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเดิมกับ หน้าตัดแตกร้าว ความลึกจากแกนสะเทินถึงผิวรับแรงอัด โมเมนต์พลาสติก และหน่วยแรงคราก

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของคอนกรีตเสาเข็มและแผ่นเหล็กกระจายแรง

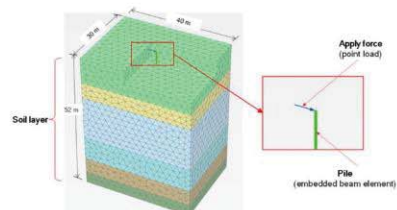
Material	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν
Concrete	24	25×10^6	0.2
Steel plate	78.5	200×10^6	0.3



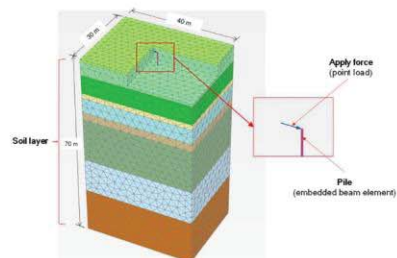
รูปที่ 13 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มเดี่ยว F1



รูปที่ 14 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3



รูปที่ 15 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มแบบเรีตรูป 0.8m x 2m



รูปที่ 16 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวที่

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเสาเข็มของ EBE

Barrette type	I_{gross} (m^4)	I_{crack} (m^4)	compression depth (m)	M_p (kNm)	σ_y (N/mm^2)
Bored pile 1.5m dia.	0.2485	0.1181	0.21	7120	12600
RB-MJ 0.8m x 2.0m	0.5333	0.10676	0.46	5050	21760
RB-MN 0.8m x 2.0m	0.0853	0.01826	0.18	2056	20262
TB (1x3m)+(1x2m)	3.1617	0.40325	0.42	10400	10832

ตารางที่ 3 ข้อมูลชั้นดินของการทดสอบเสาเข็ม F1, F2 และ F3

Soil (depth)	γ_t (kN/m^3)	S_u (kPa)	SPT-N (N/ft)	ϕ' (degree)
Soft Clay (-1 m to -8 m)	17	20	-	-
Medium Clay (-8 m to -14 m)	16.5	40	-	-
Very Stiff Clay (-14 m to -22.7 m)	18.5	165	20	-
Dense Sand (-22.7 m to -31.4 m)	20	-	45	34
Very Stiff Clay (-31.4 m to -34 m)	18.5	150	30	-
Very Dense Sand (-31.4 m to -38.5 m)	21	-	50	36
Hard Clay (-38.5 m to -41.5 m)	20.50	380	50	-

ตารางที่ 4 ข้อมูลชั้นดินของการทดสอบเสาเข็มแบบเรีต RB-MJ

Soil (depth)	γ_t (kN/m^3)	S_u (kPa)	SPT-N (N/ft)	ϕ' (degree)
Soft Clay (-0.5 m to -10 m)	17	18	-	-
Medium Clay (-10 m to -16 m)	17.5	33	-	-
Very Stiff Clay (-16 m to -32.5 m)	21.5	175	30	-
Hard Clay (-32.5 m to -41.5 m)	20	272	40	-
Very Dense Sand (-41.5 m to -47.5 m)	21.4	-	55	35
Hard Clay (-47.5 m to -52 m)	21	312	60	-

ตารางที่ 5 ข้อมูลชั้นดินของการทดสอบเสาเข็มแบบเรีต RB-MN

Soil (depth)	γ_t (kN/m^3)	S_u (kPa)	SPT-N (N/ft)	ϕ' (degree)
Soft Clay (0.5 m to -11.5 m)	18	13	20	-
Medium Clay (-11.5 m to -18.5 m)	18	35	40	-
Very Stiff Clay (-18.5 m to -20.5 m)	20	136	20	-
Hard Clay (-20.5 m to -40 m)	21	230	45	-
Very Dense Sand (-40 m to -47.5 m)	20	-	50	35
Very Stiff Clay (-47.5 m to -52 m)	21.5	170	20	-

5. ผลการวิจัย

5.1 ประสิทธิภาพของเสาเข็มขนาดใหญ่จากการทดสอบในสนาม

สำหรับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มเจาะเดี่ยว เสาเข็มเจาะแบบเรีต เสาเข็มแบบเรีตรูปตัวที่ และเสาเข็มเจาะกลุ่มแบบ F2, F3 เมื่อเปรียบเทียบ เป็นความสัมพันธ์ของผลการเคลื่อนตัวในแนวนอนกับแรงกระทำด้านข้าง

พบว่าเสาเข็มกลุ่มแบบ F2, F3 และเสาเข็มแบบเรีตูปตัวที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากผลการยึดรั้งที่หัวเสาเข็มด้วย pile cap ในเสาเข็มกลุ่ม และโมเมนต์ความเค้นที่สูงมากของเสาเข็มแบบเรีตูปตัวที่ รองลงมา คือ เสาเข็มเจาะเดี่ยว และเสาเข็มแบบเรีตูปตัวรับแรงด้านแคบ ส่วนเสาเข็มเจาะแบบเรีตูปตัวรับแรงด้านกว้างมีประสิทธิภาพในการรับแรงด้านข้างต่ำสุด

ตารางที่ 6 ข้อมูลชั้นดินของการทดสอบเสาเข็มแบบเรีตูปตัว TB [6]

Soil (depth)	γ_t (kN/m ³)	S_u (kPa)	E_u (kPa)
Crust, Medium Clay (-0 m to -1 m)	18	35	59500
Very Soft Clay (-1 m to -6 m)	16	18	32000
Soft Clay (-6 m to -13 m)	16.5	22	39000
Medium Clay (-13 m to -15 m)	18	35	55500
Stiff Clay (-15 m to -20.5 m)	17.5	100	280000
Medium Dense Sand (-20.5 m to -23.5 m)	18	-	500000
Very Stiff Clay (-23.5 m to -40 m)	18	110	308000
Hard Clay (-40 m to -53 m)	19	200	560000
Very Dense Sand (-53 m to -70 m)	19.5	-	990000

5.2 การวิเคราะห์กลับเพื่อหาค่าสถิติในสัทที่เหมาะสม

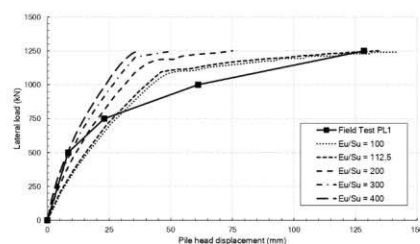
สำหรับสถิติในสัทที่เหมาะสมสำหรับเสาเข็มเจาะเดี่ยวและเสาเข็มเจาะกลุ่มด้วยแบบจำลองดิน HSM ในรูปที่ 16 นั้นจะพบว่า ผลของการแปรผันสถิติในสัทของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลางของแบบจำลองดิน HSM โดยใช้ fine mesh ได้ผลวิเคราะห์ในรูปของหน่วยแรงรวมแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ใช้ในเชิงวิศวกรรมออกแบบเสาเข็มในช่วงใช้งานที่ยังไม่เกิดการวิบัติ คือ E_u / S_u อยู่ในช่วงระหว่าง 200 – 300 ซึ่งอยู่ในช่วงเสาเข็มมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรง ส่วนอีกกรณีใช้สำหรับศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มในภาพรวม คือ E_u / S_u เท่ากับ 112.5 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้สถิติในสัทในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มต่อไป

5.3 พฤติกรรมเสาเข็มจากการวิเคราะห์โดย FEM

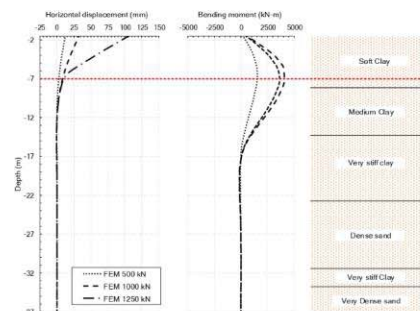
พฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยว เมื่อพิจารณาการโก่งตัวที่แปรผันกับความลึกในรูปที่ 17 จะเห็นว่า การโก่งตัวของเสาเข็มจะเกิดขึ้นมากในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลาง โมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ความลึกจากผิวดินลงไปประมาณ 7 เมตรและมีค่าเท่ากับ 4090 กิโลนิวตันที่กระทำ 1250 กิโลนิวตัน

ส่วนพฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่มแบบ F2 และ F3 โดยพิจารณาการโก่งตัวที่แปรผันตามความลึกในรูปที่ 18 สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 และรูปที่ 19 สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F3 ผลวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าการโก่งตัวของเสาเข็มจะเกิดขึ้นมากในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลางเช่นเดียวกับ

เสาเข็มเดี่ยว แต่โมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดขึ้นสูงสุดจำนวน 2 ตำแหน่ง คือ บริเวณใต้ pile cap เนื่องจากหัวเสาเข็มในกลุ่มถูกยึดรั้งด้วย pile cap และอีกจุด คือ บริเวณความลึก 10 เมตรจากผิวดิน ตามลำดับ โดยขณะให้แรงกระทำด้านข้างเท่ากับ 4000 กิโลนิวตันนั้น เสาเข็มกลุ่ม F2 จะมีโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 3880 กิโลนิวตัน-เมตร ในขณะที่เสาเข็มกลุ่ม F3 จะมีโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 2205 กิโลนิวตัน-เมตร สำหรับผลต่างของโมเมนต์ที่ต่างกันของเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ยังชี้ให้เห็นว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 จะเข้าสู่สภาวะประลัยก่อนเสาเข็มในกลุ่ม F3



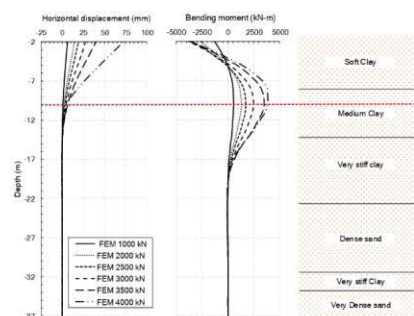
รูปที่ 16 ผลวิเคราะห์กลับเพื่อหาค่าสถิติในสัทของดินเหนียวอ่อนของ F1



รูปที่ 17 ผลวิเคราะห์การโก่งตัวและโมเมนต์ดัดของ F1

สำหรับพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินกรุงเทพ ภายใต้แรงกระทำต่อเสาเข็มหนึ่งต้นสูงมากนั้น ผลวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลทดสอบในสนามนั้นยังขึ้นกับความละเอียดของ FEM mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในรูปที่ 20 และรูปที่ 21 จะเห็นถึงผลของการเลือกใช้ความละเอียด FEM mesh สำหรับเสาเข็มเดี่ยว F1 และเสาเข็มกลุ่ม F2 ซึ่งผลของแรงกระทำที่สภาวะประลัยของเสาเข็มส่งผลถึงความละเอียด FEM mesh ที่ใช้ โดย fine mesh กับ medium mesh ให้ผลวิเคราะห์ที่เหมาะสมกับผลทดสอบในสนาม นอกจากนี้ในรูปที่ 21 จะเห็นได้ว่า fine mesh ให้ผลการจำลองการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม F1 สูงกว่าผลทดสอบในสนาม เนื่องจากมีตำแหน่งของ stress point ที่ไม่ตรงกับตำแหน่งที่มีความเค้นสูงสุดในสนาม การคำนวณจึงดำเนินไปอย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการวิบัติ

ซึ่งอิทธิพลของความละเอียด FEM mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้เสนอไว้ในงานวิจัยของ [9-11] สำหรับตารางที่ 7 และตารางที่ 8 ยังชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของผลวิเคราะห์ด้วยความละเอียด FEM mesh ที่แตกต่างกัน โดยผลวิเคราะห์ด้วย coarse mesh และ medium mesh สำหรับเสาเข็ม F1 ให้ผลวิเคราะห์ที่น้อยกว่าผลทดสอบในสนามประมาณ 100 มิลลิเมตร ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วย fine mesh ให้ผลวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ส่วนเสาเข็มกลุ่ม F2 ให้ผลวิเคราะห์ด้วย fine mesh ที่มีแนวโน้มการเคลื่อนตัวสูงกว่าผลทดสอบในสนามมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วย coarse mesh ให้ผลวิเคราะห์ที่น้อยกว่าผลทดสอบในสนาม 32 มิลลิเมตร ส่วนการวิเคราะห์ด้วย medium mesh ให้ผลวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามมากที่สุด จากผลของความแตกต่างของ FEM mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มนี้ ผู้วิจัยจึงได้เสนอแนวทางการเลือกใช้ FEM mesh ในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลวิเคราะห์ที่เหมาะสม โดย medium mesh นั้นมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์พฤติกรรมเสาเข็มที่อยู่ในช่วงที่เป็นเส้นตรงหรือเสาเข็มที่อยู่ในสภาวะใช้งาน ซึ่งควรมีแรงกระทำในสภาวะนี้ไม่เกินร้อยละ 40 ของแรงกระทำปลายซึ่งเป็นการพิจารณาที่สัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.5

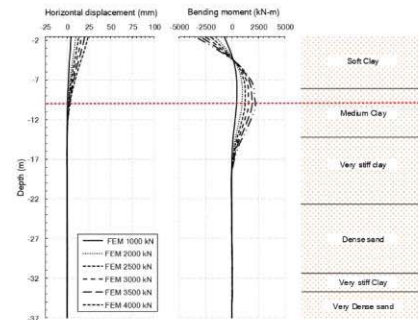


รูปที่ 18 ผลวิเคราะห์การโก่งตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม F2

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบการจำลองความละเอียด mesh ของเสาเข็มเดี่ยว

Mesh type	Number of nodes	Number of elements	Max horizontal disp. at load 1250 kN (mm)
Coarse	8391	5169	35.41
Medium	17079	10872	39.20
Fine	38299	25249	135.05

ส่วนเสาเข็มกลุ่ม F3 มีการโก่งตัวน้อยกว่าเสาเข็ม F1 และ F2 เนื่องจากแรงกระทำตอนเสาเข็มต่ำมากและการยึดรั้งหัวเสาเข็มด้วย pile cap ในรูปที่ 22 เป็นผลวิเคราะห์เสาเข็ม F3 เห็นได้ว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วย FEM นั้นจะให้ผลวิเคราะห์เชิงเส้นตรงเช่นเดียวกับเสาเข็มที่จำลองพฤติกรรมแบบอีลาสติกเนื่องจากเสาเข็มมีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นไม่เกินหน่วยแรงครากของวัสดุเสาเข็ม

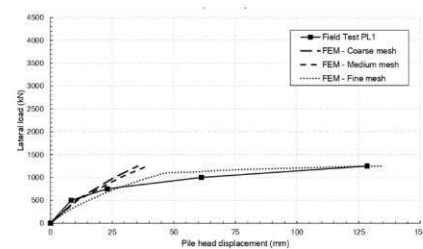


รูปที่ 19 ผลวิเคราะห์การโก่งตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม F3

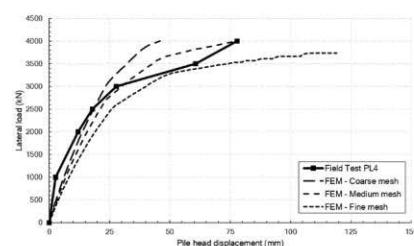
ตารางที่ 8 เปรียบเทียบการจำลองความละเอียด mesh ของเสาเข็มกลุ่ม F2

Mesh type	Number of nodes	Number of elements	Max horizontal disp. at load 4000 kN (mm)
Coarse	13344	8314	45.85
Medium	22207	14206	77.84
Fine	43451	28585	119.97*

หมายเหตุ * คือ หยุดการคำนวณที่แรงกระทำ 3736 กิโลนิวตัน



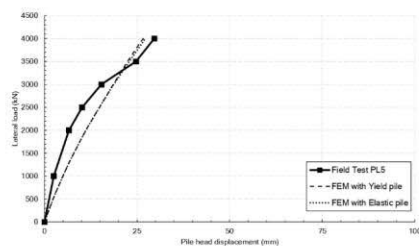
รูปที่ 20 ผลของความละเอียด mesh สำหรับการวิเคราะห์เสาเข็ม F1



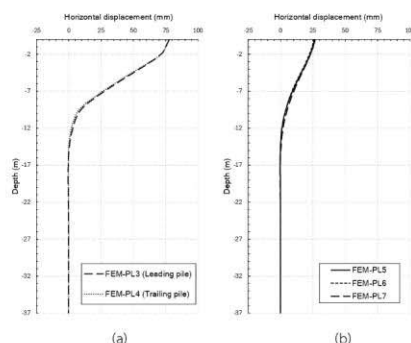
รูปที่ 21 ผลของความละเอียด mesh สำหรับการวิเคราะห์เสาเข็ม F2

สำหรับผลวิเคราะห์ของเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ชี้ให้เห็นว่าอิทธิพลของการยึดรั้งหัวเสาเข็มด้วย pile cap นั้นส่งผลต่อการโก่งตัวของเสาเข็มเช่นเดียวกับเสาเข็มที่ทดสอบในสนาม นอกจากนี้ อิทธิพลของระยะห่าง

ของเสาเข็มในกลุ่มที่มีระยะห่างกันเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนั้น พบว่าผลวิเคราะห์ด้วย FEM สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ในรูปที่ 23 จะเห็นว่าผลวิเคราะห์การโก่งตัวที่แปรผันกับความลึกนั้นไม่แสดงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มในกลุ่มที่ส่งผลให้เสาเข็มเกิดการโก่งตัวที่แตกต่างกัน

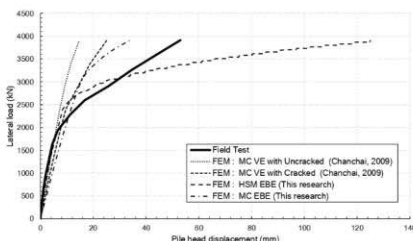


รูปที่ 22 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F3



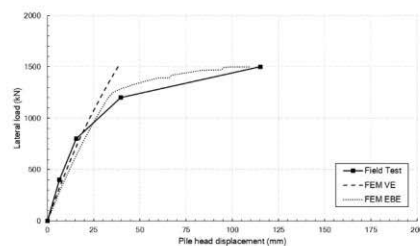
รูปที่ 23 FEM mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม (a) F2 และ (b) F3

การวิเคราะห์เสาเข็มแบบเรีตูปตัวที่ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติโดยจำลองเสาเข็มโดยใช้ EBE ที่แปลงพื้นที่จริงเป็นรัศมีเทียบเท่าของหน้าตัดวงกลม เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบในสนามกับผลวิเคราะห์โดย VE กับแบบจำลองดิน MC ของงานวิจัย [6], และผลวิเคราะห์ด้วย EBE ในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 24 จะเห็นว่าผลการจำลองเสาเข็มด้วย EBE ให้ผลวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามมากขึ้นเมื่อเทียบกับงานวิจัยในอดีต [6] แต่เมื่อเสาเข็มรับแรงกระทำสูงมากที่แรงกระทำประมาณ 3000 ถึง 3500 กิโลนิวตันขึ้นไปนั้น ผลวิเคราะห์ให้ค่าการเคลื่อนตัวที่สูงกว่าผลทดสอบในสนามมาก เนื่องจากพฤติกรรมของเสาเข็มที่สภาวะแรงกระทำดังกล่าวเข้าสู่สภาวะปรัสเซีย ซึ่งผลวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองดิน HSM นั้นจะให้ผลวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับกรณีที่จำลองด้วยแบบจำลองดิน MC ในช่วงที่เสาเข็มมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงในช่วงแรก ผลการกำหนดความเค้นครากใน EBE นั้นส่งผลให้เสาเข็มนั้นสามารถเกิดการครากได้เมื่อน้อยแรงที่เกิดขึ้นเกินหน่วยแรงคราก

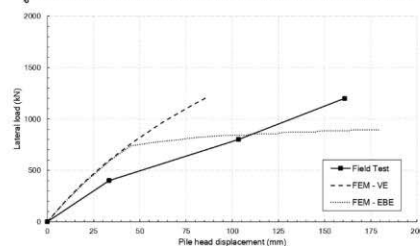


รูปที่ 24 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์เสาเข็มแบบเรีตูปตัวที่

ส่วนการวิเคราะห์เสาเข็มแบบเรีตูปตัวที่ 0.8 เมตร x 2 เมตร โดยให้แรงกระทำต่อผิวด้านแคบ 0.8 เมตร (RB-MU) ให้ผลวิเคราะห์ดังรูปที่ 25 และการให้แรงกระทำต่อผิวด้านกว้าง 2 เมตร (RB-MN) ให้ผลวิเคราะห์ดังรูปที่ 26 จะเห็นว่าผลการให้แรงกระทำต่อ RB-MU จะเกิดการโก่งตัวของเสาเข็มน้อยกว่าการให้แรงกระทำต่อ RB-MN เนื่องจากผลของความแรงของหน้าตัดจากการที่ไม่มีเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดสูงกว่าการให้แรงกระทำในอีกด้านหนึ่ง โดย RB-MU เกิดการครากที่แรงกระทำประมาณ 1250 กิโลนิวตัน ในขณะที่ RB-MN เกิดการครากที่แรงกระทำประมาณ 750 กิโลนิวตัน แต่พบว่าผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของ RB-MN มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในขณะที่แรงกระทำเพิ่มขึ้นไม่มาก จึงได้พิจารณาหยุดการคำนวณที่แรงกระทำ 896 กิโลนิวตัน



รูปที่ 25 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์เสาเข็มแบบเรีตูปตัวที่รับแรงด้านแคบ 0.8 เมตร



รูปที่ 26 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์เสาเข็มแบบเรีตูปตัวที่รับแรงด้านกว้าง 2 เมตร

นอกจากนี้ผลวิเคราะห์ของ RB-MN ในรูปที่ 26 ยังพบอีกว่าการจำลองโดยให้แรงกระทำต่อ RB-MN นั้นให้ผลวิเคราะห์ที่ต่างจากผลทดสอบใน

สนาม เมื่อเทียบกับผลวิเคราะห์ของการให้แรงต่อ RB-MJ อาจมีเหตุผลมาจากความผิดปกติของผลทดสอบในสนามหรือผลจากการแปลงหน้าตัดจริงที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับ EBE

6. บทสรุป

ประสิทธิภาพของเสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างจะขึ้นอยู่กับการยึดรั้งหัวเสาเข็มของเสาเข็มในกลุ่ม และโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด ส่งผลให้เสาเข็มกลุ่มแบบ 2 ต้น, กลุ่มแบบ 3 ต้น และเสาเข็มแบบเรีตรูปตัว H นั้นมีประสิทธิภาพสูงสุด ส่วนการวิเคราะห์เสาเข็มโดยวิธี FEM ที่จำลองเสาเข็มด้วย EBE โดยแบบจำลองวัสดุแบบ elastoplastic ที่ให้ผลทดสอบใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามด้วยแบบจำลองดิน HSM ที่ใช้ในด้านวิศวกรรมการออกแบบในช่วงเสาเข็มยังไม่เกิดการวิบัติที่สัดส่วนลดทอน 2.5 หรือที่แรงกระทำประมาณร้อยละ 40 ของแรงกระทำประลัย คือ E_u / S_u อยู่ระหว่าง 200 – 300 ซึ่งสถิติเหล่านี้จะใช้ในกรณีที่ไม่มีผลทดสอบหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน HSM ในห้องปฏิบัติโดยตรง ส่วนผลวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่มนั้นมีการโค้งตัวของเสาเข็มแต่ละต้นใกล้เคียงกันทุกต้นเนื่องจากมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มแต่เพียงพอและผลจากความละเอียดของการจำลองเชิงตัวเลข ส่วนพฤติกรรมของเสาเข็มนั้นจะโค้งตัวมากในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลาง โดยผลวิเคราะห์ด้วย FEM นั้นให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามในช่วงที่เสาเข็มมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรง และผลของความละเอียดของ FEM mesh นั้นมีผลต่อผลวิเคราะห์ งานวิจัยนี้เสนอว่า medium mesh สามารถใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มในช่วงพฤติกรรมเชิงเส้นตรงที่สัดส่วนลดทอนดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ได้ ส่วนการวิเคราะห์แบบเรีตรูปตัว H นั้นใช้หน้าตัดวงกลมที่จำลองด้วย EBE เพื่อนำผลวิเคราะห์ไปใช้ในเชิงวิศวกรรมนั้นอาจต้องมีการศึกษาข้อดีผลจากการแปลงหน้าตัดร่วมด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Cox, W.R., Dixon, D.A. and Murphy, B.S., 1984. Lateral-load tests on 25.4-mm (1-in.) diameter piles in very soft clay in side-by-side and in-line groups. In Laterally loaded deep foundations: Analysis and performance. ASTM International.
- [2] Wang, S.T. and Reese, L.C., 1986. Study of design method for vertical drilled shaft retaining walls. Final report (No. FHWA/TX-87/44+ 415-2F).
- [3] Shibata, T., Yashima, A. and Kimura, M., 1989. Model tests and analyses of laterally loaded pile groups. Soils and foundations, 29(1), pp.31-44.
- [4] Wachiraprakarnpong, A., 1993. Performance of grouted and non-grouted bored piles in Bangkok subsoils. Master of Engineering. Thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- [5] Thipsunontha, S., Sramoon, W. and Submaneepong, C., 2016. Behavior of Soil-Pile Interaction of Barrette Pile under Lateral Loading. Engineering Transactions: A Research Publication of Mahanakorn University of Technology, 19(1), pp.39-47.
- [6] Submaneepong, C., 2009. Behavior of vertical and lateral load on T-Shape barrette and bored piles. Doctoral dissertation, Chulalongkorn University, Thailand
- [7] Likitlersuang, S., Chheng, C., Surarak, C. and Balasubramaniam, A., 2018. Strength and stiffness parameters of Bangkok clays for finite element analysis. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 49(2), pp.150-156.
- [8] Wang, C.K. and Salmon, C.G., 1979. Reinforced concrete design. 6th edition. Wiley.
- [9] Koutsabeloulis, N.C. and Griffiths, D.V., 1989. Numerical modelling of the trap door problem. Geotechnique, 39(1), pp.77-89.
- [10] De Borst, R. and Vermeer, P.A., 1984. Possibilities and limitations of finite elements for limit analysis. Geotechnique, 34(2), pp.199-210.
- [11] Dao, T.P.T., 2011. Validation of PLAXIS embedded piles for lateral loading. Master of Science Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.